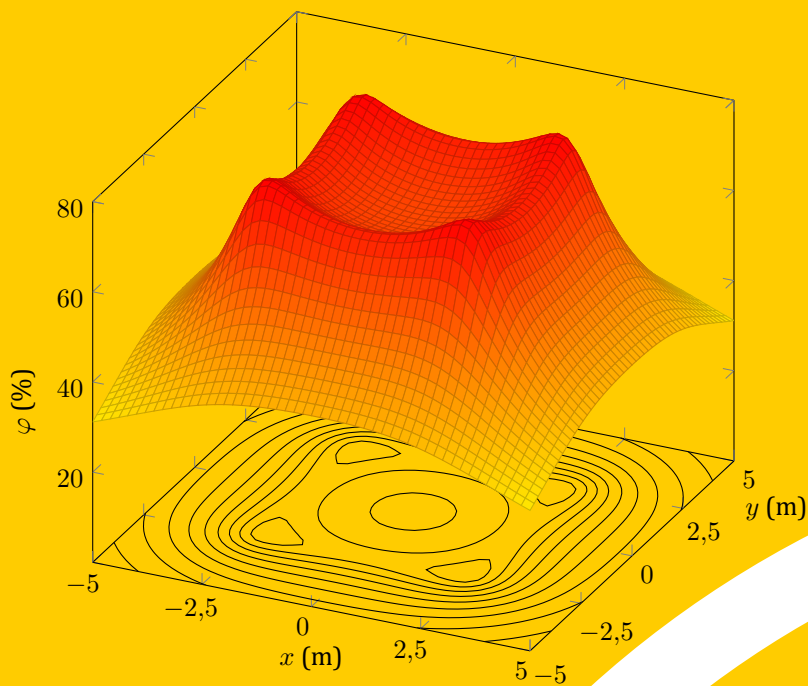


Р. Ачковски, М. Тодоровски

ЗАЗЕМЈУВАЧИ И ЗАЗЕМЈУВАЧКИ СИСТЕМИ ВО ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТСКИТЕ МРЕЖИ



Скопје, 2017



Универзитет „Св. Кирил и Методиј“, Скопје
Факултет за електротехника
и информациски технологии



Р. Ачковски, М. Тодоровски

**ЗАЗЕМЈУВАЧИ И ЗАЗЕМЈУВАЧКИ СИСТЕМИ
ВО ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТСКИТЕ МРЕЖИ**

Скопје, 2017

Рецензенти:

Д-р Драгослав Рајичиќ, редовен професор,
Универзитет „Св. Кирил и Методиј“, Скопје
Факултет за електротехника и информациски технологии

Д-р Николче Ацески, редовен професор,
Универзитет „Св. Климент Охридски“, Битола
Технички факултет

Издавач

Универзитет „Св. Кирил и Методиј“, Скопје
Факултет за електротехника и информациски технологии

СОДРЖИНА

1 Општо за заземјувачите и заземјувачките системи во електроенергетските мрежи	1
1.1 Основни поими	1
1.2 Цел, предмет и област на изучување	3
1.3 Методологија за анализа и моделирање	5
1.4 Основна задача на заземјувачите. Видови заземјувачи . . .	10
1.4.1 Поделба на заземјувачите	11
1.4.2 Карактеристични величини на заземјувачите	12
1.5 Електричен удар и ефекти од струјата на ударот	21
1.5.1 Општо	21
1.5.2 Критериуми за опасност, ризик, прописи	23
1.5.3 Ризик според ИЕС	24
1.5.4 Останати критериуми за опасност	24
1.5.5 Осврт кон постојните прописи кај нас и во светот . . .	28
1.5.6 Прописи и препораки кај некои од поразвиените земји во светот	30
2 Карактеристики на тлото и негово влијание врз карактеристиките на заземјувачите	53
2.1 Специфична отпорност на тлото	53
2.1.1 Влажност на земјата	54
2.1.2 Соленост на земјата	57
2.1.3 Температурата на земјата	57
2.1.4 Геолошки состав на земјата	58
2.1.5 Набиеност на земјата	58
2.2 Мерење на специфичната отпорност на тлото	59
2.2.1 Организација на мерењето	61
2.2.2 Интерпретација на резултатите	61
2.2.3 Корозиска агресивност на тлото	62
2.2.4 Материјали за изработка на заземјувачите и видови заземјувачи	63
3 Моделирање на заземјувачите со помош на компјутер	67
3.1 Општо	67
3.1.1 Основна задача на проектирањето на заземјувач . . .	67

3.1.2	Решавање на заземјувач	67
3.1.3	Начини за решавање и анализа	68
3.2	Струјно поле на заземјувач. Општи Максвелови равенки . .	69
3.2.1	Случај кога заземјувачот е составен од праволиниски елементи	73
3.2.2	Заемна отпорност помеѓу спроводник и точка	73
3.2.3	Сопствена отпорност на спроводник	75
3.2.4	Меѓусебна отпорност помеѓу два праволиниски спроводника	76
3.2.5	Решавање на Нојмановиот интеграл	77
3.2.6	Нумеричко решавање на Нојмановиот интеграл	79
3.2.7	Заземјувач поставен во ограничена средина. Метод „лик во огледало“	97
3.3	Програма за решавање заземјувачи	117
3.3.1	Влезни податоци	117
3.3.2	Решавање на заземјувачот	121
3.3.3	Цртање на промена на потенцијалот во одредена област и по зададени линии	123
4	Решавање на спрегнати заземјувачи	127
4.1	Општо	127
4.2	Два заемно спрегнати заземјувача (активен и пасивен) . . .	129
4.3	Специјални случаи	133
4.3.1	Пасивниот заземјувач е на нулти потенцијал	133
4.3.2	Пасивниот заземјувач е изолиран	133
4.4	Извезен потенцијал на работниот заземјувач кај ТС СН/НН	134
4.5	Анализа на начинот на заземјување на металната ограда на ТС	139
4.6	Извоз на потенцијали во станбените и други видови објекти	143
5	Типски заземјувачи на надземните водови и нивни карактеристики	149
5.1	Општо за заземјувањето на надземните водови	149
5.1.1	Осврт кон прописите за заземјување на столбовите. Технички препораки. Постојна практика	151
5.2	Техничка препорака ТП-9 [12]	156
5.2.1	Основни технички услови за изведување на зазем- јувањето на столбовите според ТП-9	156
5.2.2	Основни критериуми за димензионирање на заземјувачите на столбовите	157
5.3	Изведба на заземјувањето на столбовите	160
5.3.1	Изведба на заземјувањето на нисконапонските столбови	160
5.3.2	Изведба на заземјувањето на столбовите на 10 kV и 20 kV водови	160

5.3.3	Изведба на заземјувањето на столбовите на 35 kV водови според ТП-9	161
5.3.4	Изведба на заземјувањето на столбовите на 110 kV водови	162
5.3.5	Примена на заштитни јажиња	163
5.3.6	Мерење на отпорноста на распростирање на заземјувачите на столбовите	164
5.4	Типски заземјувачи на столбовите од НВ	164
5.4.1	Зракасти заземјувачи	165
5.4.2	Прстенести заземјувачи	167
5.4.3	Комбинирани прстенести-зракасти заземјувачи	168
5.4.4	Типски заземјувачи на столбовите за висок и највисок напон	170
5.5	Основни карактеристики на типските заземјувачи на надземните водови	173
5.5.1	Типски заземјувачи за СН столбови 10, 20 и 35 kV	174
5.5.2	Фреквентни хистограми	182
5.5.3	Карактеристики на типските заземјувачи за 110 kV столбови	184
5.6	Ударна отпорност на распростирање на заземјувачите	188
5.6.1	Импулсни коефициенти на долгите хоризонтални заземјувачи	188
5.6.2	Јонизација и електрични празнења во тлото	203
5.6.3	Импулсни коефициенти на типските заземјувачи на НВ	204
6	Заземјувачи на ТС СН/НН и ВН/СН	219
6.1	Заштитни заземјувачи на ТС СН/НН	219
6.1.1	Типски заштитни заземјувачи на ТС СН/НН според Препораката ТП 7 [11]	220
6.1.2	Останати видови типски заштитни заземјувачи на ТС СН/НН	221
6.1.3	Основни карактеристики на некои од типските заштитните заземјувачи	224
6.2	Работни заземјувачи на ТС СН/НН	227
6.2.1	Избор на форма и димензии на работниот заземјувач	228
6.3	Заземјување на ТС ВН/ВН и ТС ВН/СН	231
6.3.1	Пресметка на карактеристичните величини на заземјувачот – практични изрази	232
6.3.2	Формули за пресметка на отпорноста на распростирање на мрежестиот заземјувач R_Z	234
6.3.3	Случај кога мрежестиот заземјувач е закопан во двослој со параметри ρ_1 , ρ_2 и H	235
6.3.4	Осврт кон прописите и препораките за изведување на заземјувањето на ТС ВН/СН	236

6.3.5	Пресметка на мрежестите заземјувачи на ТС ВН/СН со компјутерска симулација	238
7	Надземен вод како елемент од заземјувачкиот систем на електроенергетските мрежи	241
7.1	Општо	241
7.2	Идеализиран модел на заземјувачкиот систем на надземен вод	242
7.2.1	Напони и струи на заштитното јаже	242
7.2.2	Приближни изрази за влезната импеданција	247
7.3	Егзактно моделирање на заземјувачкиот систем на надземен вод	248
7.4	Примери и задачи	255
7.5	Решавање на моделот на заземјувачкиот систем на надземен вод со примена на матрици	266
7.5.1	Општ случај	266
7.6	Одредување на параметрите на π -еквивалентната шема на водот	268
8	Електроенергетски кабли во заземјувачкиот систем	281
8.1	Општо за електроенергетските кабли и нивната улога	281
8.2	Кабли со неизолиран метален плашт	283
8.2.1	Струи и напони на металниот плашт	284
8.2.2	Влезна импеданција и пренесен (изнесен) потенцијал	286
8.3	Кабли со изолиран метален плашт	289
8.3.1	Идеализиран модел на ЗС на кабелот	290
8.3.2	Егзактен модел со уважување на индуктивните спреги	293
8.3.3	Аналитички изрази за пресметка на еквивалентните параметри на каблите во некои карактеристични случаи. Редукционен фактор	298
8.4	Примери и задачи	301
9	Анализа на сложени заземјувачки системи	343
9.1	Општо	343
9.1.1	Моделирање на концентрираните заземјувачи на електроенергетските објекти (ЕЕО)	344
9.1.2	Моделирање на надземните водови	344
9.1.3	Моделирање на електроенергетските кабли	345
9.1.4	Моделирање на струјата на земјоспојот	346
9.1.5	Формирање на колото на заземјувачкиот систем	346
9.2	Нумеричка постапка за пресметување	349
9.2.1	Пресметка на напоните во колото на ЗС	349
9.2.2	Пресметка на струите во колото на заземјувачкиот систем	350

9.2.3	Примери од областа на сложените заземјувачки системи	351
9.2.4	Програма за решавање сложени заземјувачки системи	363
10	Примери од разни области	375
11	Прилог: Гаусова распределба	413
12	Прилог: Основни поими за MATLAB	415
12.1	Операции со матрици	416
12.2	Системи линеарни равенки	422
12.3	Дефинирање на функции	427
12.4	Изводи и интеграли	432
12.5	Функции со повеќе променливи	434
13	Список на кратенки	441
14	Регистар на поважните ознаки со значења	443
15	Литература	447

1

ОПШТО ЗА ЗАЗЕМЈУВАЧИТЕ И ЗАЗЕМЈУВАЧКИТЕ СИСТЕМИ ВО ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТСКИТЕ МРЕЖИ

1.1 Основни поими

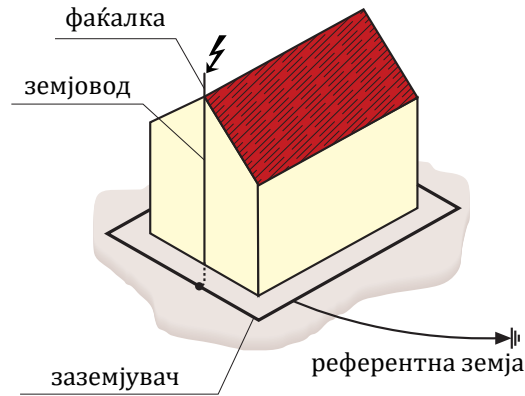
Според постојниот Правилник за техничките нормативи за заземјување на електроенергетските постројки со номинален напон над 1000 V [1], под поимот заземјување во електроенергетската мрежа (ЕЕМ) односно во електроенергетскиот систем (ЕЕС) се подразбира комплексот од мерки и средства коишто се преземаат со цел да се обезбедат услови за нормална работа на системот, безбедна работа и движење на луѓето и животните во близина на објектите кои можат да дојдат под напон во нормални или во хавариски услови

Да се заземји некој уред, апарат или објект значи спроводните делови од тој уред или објект галвански да се поврзат со заземјувачкиот систем (ЗС).

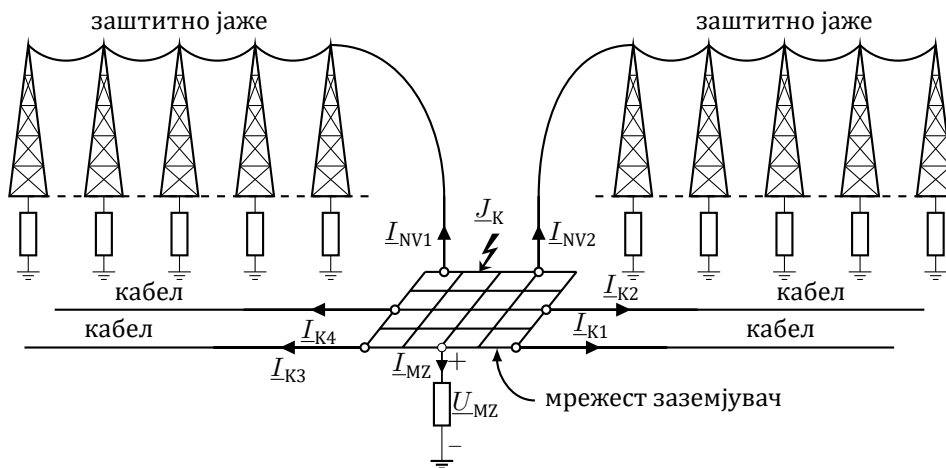
Заземјувачкиот систем, пак, го сочинуваат сите меѓусебно галвански поврзани елементи а тоа се заземјувачот на објектот и другите метални делови коишто имаат директен контакт со тлото (темелните заземјувачи на градежните објекти), заштитните јажиња кај надземните електроенергетски водови, металните плаштови кај електроенергетските кабли и др. Во ЗС спаѓаат и сите останати средства наменети за галванско поврзување на објектите од ЗС.

Под поимот „заземјувач“, се подразбира множеството на неизолирани и меѓусебно галвански поврзани спроводници (хоризонтални и вертикални), поставени во земјата, кои што се наоѓаат во добар електричен контакт со почвата и имаат првенствена задача струјата на земјоспој, која се нарекува и „струја на грешка“, или струјата од атмосферското празнење (кога се работи за удари на гром), да ја спроведат во земјата така што на површината од земјата да не се јават

напони кои ќе го загорат животот на луѓето и животните што можат да се најдат во непосредната околина на заземјувачот.



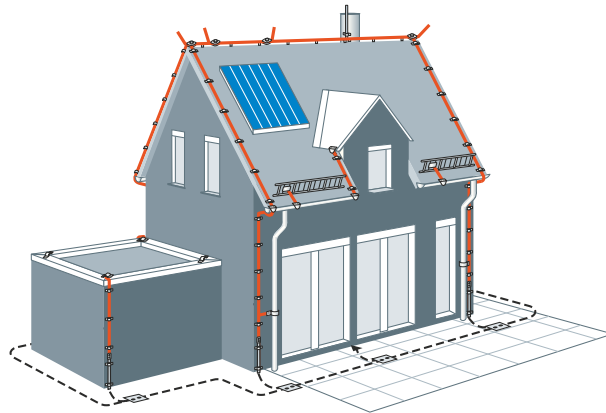
Слика 1.1. Заземјувач како елемент на една громобранска инсталација



Слика 1.2. Заземјувачки систем на една 110 kV разводна постројка

Заземјувачот треба да има што е можно помала преодна отпорност према земјата, која уште се нарекува „отпорност на распростирање“ за да се обезбеди струјата на грешката да задржи доволно висока вредност заради дејствување на соодветната релејна заштита, ако е таа предвидена.

Заземјувачкиот систем на една електроенергетска мрежа претставува сложено електрично коло составено од елементи со концентрирани параметри и елементи со распределени параметри. Во првиот вид елементи на заземјувачкиот систем спаѓаат: заземјувачите



Слика 1.3. Изглед на заземјувач од еден индивидуален станбен објект

на столбовите од надземните водови (НВ), заземјувачите на трансформаторските станици (ТС), заземјувачите на заземјените електроенергетски објекти и др., додека во вториот вид елементи (заземјувачи со распределени параметри) спаѓаат: надземните водови со заштитно јаже, енергетски кабли со спроводен надворешен плашт, челични ленти и бакарни јажиња положени во земјата, и др. Особено комплексни се заземјувачките системи на среднонапонските (СН) дистрибутивни мрежи во големите урбани средини.

1.2 Цел, предмет и област на изучување

Струи на куса врска. При работењето на ЕЕС честопати доаѓа до настанување на разни видови грешки и дефекти коишто резултираат со појава на т.н. „струи на куса врска“ (СКВ). Големината на овие струи како и нивното времетраење зависат од применетиот систем на работно заземјување на неутралната точка (НТ) во мрежата но и од карактеристиките на релејната заштита.

Видови куси врски. Кога станува збор за избор и димензионирање на заземјувачите и заземјувачките системи, од интерес се само грешките (кусите врски) пропратени со контакт со земјата бидејќи само тогаш струјата на кусата врска тече од местото на грешката, преку заземјувачот, ЗС и земјата, кон изворите на ЕЕС. Значи, од интерес се само еднофазните куси врски (земјосповеи) и двофазните куси врски со земја.

Извоз на потенцијали. При појава на еднофазни куси врски во високонапонската (ВН) мрежа, особено при грешки во трансформаторските станици висок/среден напон (ТС ВН/СН), на местото на грешката се

појавуваат потенцијали кои понекогаш достигнуваат вредност од редот на големина на неколку киловолти. Преку елементите на ЗС на мрежата (заштитни јажиња кај надземните водови, металните плаштови и арматури кај енергетските кабли, низ самата земја и сл.) тој потенцијал се извезува во СН и во нисконапонската (НН) дистрибутивна мрежа (ДМ) и во неа може да се јават потенцијали од по неколку стотини волти, кои веќе претставуваат реална опасност.

Земјоспоеви во СН мрежа. Проблеми со опасни потенцијали се јавуваат и при појава на земјоспоеви во самите дистрибутивни мрежи, особено кај оние кои имаат заземјена неутрална точка преку мал активен отпор или мала импеданција. Опасностите се присутни не само кај ТС СН/НН туку и во близината на столбовите од надземните водови. Но опасните потенцијали можат понатаму да се извезат и во НН мрежа, а со тоа и во станбените објекти. На тој начин тие можат директно да ги загрозат животите на луѓето.

Задача на заземјувачите. За да се избегнат или ублажат овие опасности потребно е електроенергетските објекти да се заземјат со соодветни заземјувачи. Заземјувачите имаат задача струјата на грешка да ја одведат во земја и истовремено да ги елиминираат или минимизираат опасностите од превисоки потенцијални разлики на допир и чекор во нивната околина.

Пораст на струјата на земјоспој. Поради ширењето на мрежите, со порастот на струјата на земјоспој растат проблемите со земните споеви во мрежата (можност за самогасење на лакот, интермитиран режим на работа на земјоспојот, појава на високи пренапони и слично).

Промена на тетманот на неутралната точка во мрежата. Од наведените причини со текот на времето се јавува потреба за напуштање на режимот на работа на СН мрежа со изолирана НТ и премин кон режим на работа со заземјена НТ. Во Република Македонија е, исто така, од наведените причини, актуелен проблемот на заземјување на НТ на поголем број СН дистрибутивни мрежи.

Можности за решавање на проблемите. Проблемите со земјоспоевите во СН мрежи можат да се разрешуваат на неколку начини, и тоа со примена на:

- заземјување преку мал активен отпор,
- заземјување преку мала импеданција,
- компензација на капацитивната струја на земјоспој со помош на т.н. „Петерсенови калем“.

Според досегашната наша практика заземјувањето на НТ во СН ДМ се вршеше преку отпорник со мал активен отпор, додека во високонапонските мрежи НТ се заземјуваше директно.

Во согласност со практиката на АД ЕСМ-ЕВН е можно, во иднина, неутралната точка на среднонапонските дистрибутивни мрежи 10, 20 и 35 kV да се заземјува преку Петерсенов калем (придушница).

1.3 Методологија за анализа и моделирање

Како што претходно беше нагласено, ЗС на една мрежа или ЕЕС претставува сложено електрично коло. Решавањето на таквото коло обично се сведува на решавање на симултан систем комплексни равенки кои, во општ случај, се нелинеарни. Кога ЗС не содржи нелинеарни елементи тогаш споменатиот симултан систем е линеарен и тој ќе може да биде решен директно. Но кога во ЗС постојат нелинеарни елементи, какви што се, нпр. надземните водови со челично заштитно јаже, енергетските кабли со челична арматура и др., проблемот станува нелинеарен и неговото нумеричко решавање е единствено можно со примена на некоја итеративна постапка. Заради упростување на пресметките обично се врши линеаризација на нелинеарните елементи од ЗС со што се постигнува значително упростување на постапката за пресметување без притоа многу да се изгуби на точност. Понекогаш се применуваат итеративни постапки за решавање на ЗС со што се надминуваат проблемите со нелинеарностите воведени од нелинеарните елементи и постоењето разни кондуктивни или електромагнетни спреги во системот.

Формирање и моделирање на ЗС. Поголем проблем при решавањето на еден ЗС е неговото моделирање и формирање. Врз точноста на добиените резултати и нивната употребливост не влијае само точноста на применетата методологија за решавање туку, во основа и доминантно, моделирањето на одделните елементи на самиот ЗС и степенот на детаљизација со кој се врши неговото формирање. За таа цел, пред да се премине кон формирањето на ЗС, во материјалов ќе се проучуваат и се разработуваат начините на моделирање на неговите одделни елементи.

За разлика од традиционалниот начин за пресметка на заземјувачите со помош на разни емпириски и/или полуемпириски формули (којшто и понатаму може да се применува за брза проценка на перформансите на заземјувачите и ЗС), овде ќе се разработат и други, напредни и многу попрецизни, техники за решавање на заземјувачите, користејќи притоа алгоритми погодни за примена на компјутери.

Модел за решавање на сложените заземјувачи. Максвелови равенки. За да се овозможи примената на напредните техники за решавање на заземјувачите со помош на компјутер најнапред ќе се проучи и разработи соодветен нумерички метод за решавање на

концентрираните заземјувачи со произволна сложеност и димензии, во општ случај. Притоа ќе бидат разгледувани случаи кога заземјувачот е поставен во хомогена средина иако разработуваниот метод овозможува и решавање на случаите кога заземјувачот е поставен во еквивалентен двослој. Според овој метод, тргнувајќи од формалната аналогија што важи за основните релации на електростатичкото и на стационарното струјно поле и применувајќи го принципот на суперпозиција, којшто важи за линеарните системи, се формира системот Максвелови (Maxwell) равенки кој ги опишува релациите што постојат помеѓу одделните елементи од заземјувачот. Влијанието на дисконтинуитетот на медиумот (почвата) што го воведува површината на земјата се опфаќа со примена на познатиот метод „лик во огледало“.

Пресметка на карактеристиките на еден заземјувач. На тој начин решавањето на еден заземјувач практично се сведува на решавање на систем линеарни, во општ случај комплексни, равенки. Со нивното решавање се добива вредноста на отпорноста на распростирање на заземјувачот R_Z , неговиот потенцијал U_Z , распределбата на струите на одведување I_Z од неговите елементи. потенцијалите $\varphi(x, y, z)$ во неговата околина, потенцијалните разлики на допир E_d , чекор E_c и друго.

Софтверски алатки. Со примена на разработениот нумерички метод е можно да се решаваат сите видови концентрирани заземјувачи, какви што се, на пример, заземјувачите на одделните ТС ВН/СН и ТС СН/НН, заземјувачите на столбовите на НВ и слично. Со помош на готов, претходно изготвен софтверски алат, базиран на овој метод, подоцна, ќе се врши пресметка на конкретните заземјувачи што се среќаваат во разгледуваната мрежа (систем). Притоа за решавањето на самиот систем Максвелови равенки се користат соодветни матрични постапки. Пресметувањето на сопствените и меѓусебните отпорности на елементите од заземјувачот се врши со помош на добро познатиот метод на средни потенцијали.

Со помош на споменатите софтверски алатки, во рамките на овој курс, ќе се врши и анализа на перформансите на типските форми заземјувачи на електроенергетските објекти што се среќаваат во практиката со цел да се согледаат основните закони и главните влијателни фактори коишто го предетерминираат нивните карактеристики како и изборот на типот и димензиите на еден заземјувач. Ќе се истражуваат перформансите на типските форми заземјувачи што се применуваат за заземјување на столбовите од надземните водови, но и заземјувачите (заштитни и работни) на трансформаторските станици и разводни постројки.

Решавање на спрегнати заземјувачи. Со помош на системот Максвелови равенки, применет на кондуктивно спрегнати заземјувачи (галвански одвоени заземјувачи што се наоѓаат блиску еден до друг) може да се решаваат и случаите кога имаме поголем број блиски, но галвански одвоени заземјувачи. Таков е случајот со заемното дејство на заштитниот и работниот заземјувач на ТС СН/НН, проблемот со заземјувањето на оградата на ТС ВН/СН и СН/СН и слично. На тој начин, истиот софтверски алат, со негова незначителна модификација, ќе се применува и за решавање на проблемите на кондуктивно заемно спрегнатите заземјувачи.

Емпириски формули и приближни релации. И покрај можноста решавањето на еден заземјувач да се врши со помош на компјутер, сепак, од голема полза за инженерот и проектантот е да биде запознаен и да ги користи практичните методи за решавање на заземјувачите, особено тогаш кога не се располага со компјутер (софтвер) или кога е потребно да се направи брза, приближна, проценка на некој проблем што се јавува или би се јавил во праксата, кога треба брзо да се донесе некоја одлука и сл. Практичните методи базираат на примената на прости, но сепак доволно точни, емпириски или полуемпириски релации со помош на кои е можно едноставно и брзо да се процени карактеристиката на еден заземјувач, перформансите на еден ЗС, ефектите од преземање/непреземање на некаков зафат во ЗС на една мрежа и слично. Ваквите упростени постапки за решавање на заземјувачите, преку разни примери во изложената материја, ќе се применуваат при изборот и димензионирањето на мрежестите ТС ВН/СН, заземјувачите на ТС СН/СН и ТС СН/НН и заземјувањето на столбовите од надземните водови.

Моделите за ЗС на надземните водови. Во учебникот се разработени и моделите за надземните водови (со и без заштитно јаже), третирано како елементи на ЗС. Секој надземен вод притоа се моделира со каскада од поголем број четворокрајници. Ќе се разработува егзактниот модел на ЗС на водот како и приближните модели, базирани на идеализираниот случај кога секој распон од водот има идентични карактеристики. Со помош на разработените модели ќе се оценува учеството на надземниот вод во одведувањето на струјата на грешка од заземјувачот на една ТС, големината на извезениот (пренесениот) потенцијал и сл.

Моделирање на ЗС на енергетските кабли. Прикажан е начин на моделирање и детално се разработени соодветни модели за енергетските кабли со изолиран плашт но и кабли со спроводен надворешен плашт, од типот РР, ХНР, ХРЕ, ХНЕ, IPO, NPO, IPZO, NPZO и др. Потоа кабелот се третира како елемент на ЗС од електроенергетската

мрежа при што се води сметка и за евентуалното присуство на дополнителните заземјувачи какви што се челичните ленти и бакарни јажиња, поставени во кабелскиот ров заедно со кабелот, но и за заземјувачите на останатите електроенергетски објекти во мрежата.

Осврт е направен и кон начинот на моделирањето на каблите со челична арматура, чии подолжни параметри зависат од струјата во плаштот и арматурата, бидејќи тие се извори на нелинеарноста но и на проблемите сврзани со нејзиното моделирање и решавање.

Слично како и при моделирањето на ЗС на еден надземен вод, ЗС на една кабелска мрежа, во општ случај, се претставува со електрично коло составено од поголем број каскадно врзани π односно Γ четворополи. Во голем број случаи делови од тој ЗС може да се еквивалентираат само со еден единствен четворопол или само со една влезна импеданција.

Електромагнетски спреги. Редукционен фактор. Елементите од ваквото електрично коло се најчесто заемно електромагнетски спрегнати. Обично ова нивно заемно влијание во досегашната инженерска практика или воопшто не било земено предвид или, пак, било уважувано само апроксимативно, што доведува до погрешни резултати при пресметките. Во овој курс ќе бидат разработени методи и постапки за нивното целосно и автентично земање предвид. Истовремено се воведува и дефинира поимот редукционен фактор на надземниот вод односно кабелот и се изложува постапка за неговото пресметување.

Услови за безопасност. Напони на допир и чекор. За да се изврши оценка на условите за безопасност од појава на превисоки напони на допир и чекор во околината на разните видови заземјувачи како и да се квантифицира висината на ризикот за настанување смрт од електричен удар, со помош на споменатиот софтвер се прават анализи на типските форми заземјувачи што се применуваат за заземјување на електроенергетските објекти во нашата практика.

Типски заземјувачи и нивни карактеристики. За таа цел најнапред се проучуваат геометријата и карактеристиките на поголемиот број типски заземјувачи на ТС СН/НН и на некои типови мрежести заземјувачи на ТС ВН/СН. Покрај тоа детално се обработени и заземјувачите на столбовите од НВ (прстенести, контурни, зракасти). При тоа за секој од нив се пресметува множество податоци, неопходни за натамошните анализи. Поважните од нив се нивните отпорности на распростирање (за зададена вредност на специфичната отпорност на тлото) максималните, просечните и минималните вредности на потенцијалните разлики на допир и чекор, како и фреквенциите на нивните појавувања, т.е. фреквентните хистограми (ФХ) на

потенцијалните разлики на допир и чекор, и др. Сите овие величини зависат исклучиво од геометријата на заземјувачот.

Пресметувањето на фреквентните хистограми на одделните типови заземјувачи се врши со компјутерска симулација (симулација Монте Карло). За нивното добивање е изработен соодветен софтвер кој, вршејќи доволен број експерименти (симулации), по статистички пат ги определува бараните перформанси на заземјувачот односно ЗС.

Напредни нумерички техники за решавање на системите равенки. Решавањето на состојбата (вредностите на напоните, тековите на струи, потенцијалните разлики на допир и чекор и сл.) во самиот ЗС, како што беше претходно напоменато, се сведува на решавање на систем линеарни (понекогаш и нелинеарни) комплексни равенки кои што прилегуваат од примената на методот на јазлови потенцијали. Кога е системот линеарен, што е најчесто случај, решението се добива директно, со решавање на матричниот систем равенки. Бидејќи матрицата на адмитанции на колото \underline{Y} со кое се моделира ЗС е слабо пополнета, со голем број нулти и мал број ненулти елементи, најпогодно е решавањето на системот равенки да се изврши со примена на техники со ретки матрици или, пак, со факторизација на матрицата на адмитанции \underline{Y} , бидејќи постојат усовершени алгоритми за факторизација кај кои максимално се води сметка за потребната меморија и кај кои потребниот број операции за нејзината факторизација, а со тоа и потребното пресметковно време, е практично линеарно зависен од редот на матрицата.

Во тој случај димензионалноста на проблемот станува ирелевантна бидејќи потребната меморија и времето потребно за решавањето на состојбата во ЗС стануваат практично линеарно зависни од неговите димензии. На овој начин со пресметка на распределбата на струјата на земјоспој во ЗС при грешка на произволно место во мрежата, понатаму, можат да се пресметаат потенцијалите во јазлите т.е. потенцијалите на поедините заземјувачи, распределбата на потенцијалите по површината на земјата во нивната околина, напоните на допир и чекор и др.

Врз основа на разработените модели и методи е изготвен софтвер наменет за брзо и едноставно определување на состојбите во ЗС со произволна сложеност и големина при појава на грешки со земја на произволна локација од системот како и анализа на сите појави.

1.4 Основна задача на заземјувачите. Видови заземјувачи

При повреди на изолацијата во ЕЕС и при појави на куси врски со земја, струјата на куса врска на местото на грешката тече во земјата.

Големината на струјата која ќе тече по водовите до заземјувачот и низ самиот заземјувач, како и времетраењето на самата куса врска, зависат од начинот на заземјување на неутралната точка во мрежата како и од карактеристиките на релејната заштита.

Во мрежите со директно заземјена неутрална точка, струите на грешка што течат во земјата можат да достигнат неколку килоампери, па дури и неколку десетици килоампери, но затоа нивното времетраење се ограничува на само неколку десетинки од секундата.

Во мрежите со изолирана неутрална точка како и во компензираните мрежи, струјата на грешка (наречена уште и струја на доземен спој) изнесува неколку десетини ампери, но траењето на земниот спој може да изнесува и неколку часови.

Опасности. Густината на струјата на местото каде што таа тече во земја е многу голема, а потенцијалите во негова близина можат да добијат опасно високи вредности. За да се избегне таа опасност во електричните централи, разводните постројки, трансформаторските станици како и кај самите столбови од надземните водови, се предвидува изведба на заземјувачи.

Заземјување – поим. Под поимот заземјување во електроенергетскиот систем (ЕЕС) се подразбира комплексот од средства и мерки што се преземаат со цел да се обезбедат услови за нормална работа на системот.

Покрај тоа со тие мерки треба да се обезбеди и безбедна работа и движење на луѓето и животните во близина на електроенергетските објекти (ЕЕО) што можат да дојдат под напон во нормални или во хавариски ситуации, како и заштита на опремата и луѓето од струите и напоните што се јавуваат при атмосферските празнења.

Заземјување – дефиниција. Да се заземји некој уред или апарат значи спроводните делови од тој апарат галвански да се поврзат со заземјувачкиот систем.

Задача на заземјувачите. Основна задача на заземјувачите е, значи, тие да создадат пат на струјата на грешка во земјата со што е можно помала преодна отпорност и со тоа да ги елиминираат или во најголема можна мера да ги ублажат опасностите поради настанатите превисоки потенцијали во околината на местото на грешката.

Покрај наведеното, заземјувачот треба да има и доволно мала преодна отпорност према тлото („отпорност на распростирање“) за да се постигне струјата на грешката да има доволно голема вредност што

ќе овозможи сигурно дејствување на релејната заштита, кога е таа предвидена.

Елементи на заземјувачите и ЗС. Елементите на заземјувачот (кои се нарекуваат електроди) се најчесто метални ленти или јажиња, челични цевки, метални плочи. Често пати како елементи на заземјувачите и ЗС се користат и разни метални творби закопани во земјата и имаат, во основа, друга намена. Такви „природни заземјувачи„ се водоводите, цевководите, топловодите, металните конструкции на индустриските градежни објекти и машини закопани во земјата, армиранобетонските темели на градбите, темелите на столбовите од далекуводите и друго. Како елементи од заземјувачите многу често се користат и неизолираните метални плаштови на енергетските кабли.

1.4.1 Поделба на заземјувачите

Поделба според положбата во земјата.

Според положбата во земјата заземјувачите се делат на: хоризонтални, вертикални и коси.

Хоризонтален (површински) заземјувач е заземјувач составен од хоризонтално положени елементи (електроди) коишто се закопани во земјата на релативно мала длабочина. Хоризонталниот заземјувач по својот облик може да биде: мрежест, зракаст, контурен (прстенест) или сложен, кој претставува комбинација на некои од споменатите облици.

Вертикален (длабински) заземјувач е заземјувач составен од еден или од повеќе стапести заземјувачи коишто се забиени вертикално во земјата и притоа се меѓусебно галвански поврзани. Должината на таквите вертикални стапови (сонди) обично изнесува од 2 до 5 m, иако понекогаш, кога долните слоеви од земјиштето имаат помала специфична отпорност, должината на сондите може да биде и поголема.

Кос заземјувач е стапест заземјувач положен косо во земјата.

Поделба според намената на заземјувачите.

Според нивната намена, заземјувачите на електроенергетските објекти се делат на: *заштитни; погонски (работни) и громобрански.*

Заштитно заземјување е галванско поврзување со заштитниот заземјувач на сите металните делови од објектот што не им припаѓаат на струјните кола ниту пак се наоѓаат непосредно во електричен контакт со нив, а сепак, во случај на грешка, можат да дојдат под напон. Заштитниот заземјувач го намалува тој напон и со тоа ја спречува можноста за појава на услови опасни по животото на луѓето коишто ракуваат со апаратите или опремата погодена со дефектот или пак се движат во нивната близина.

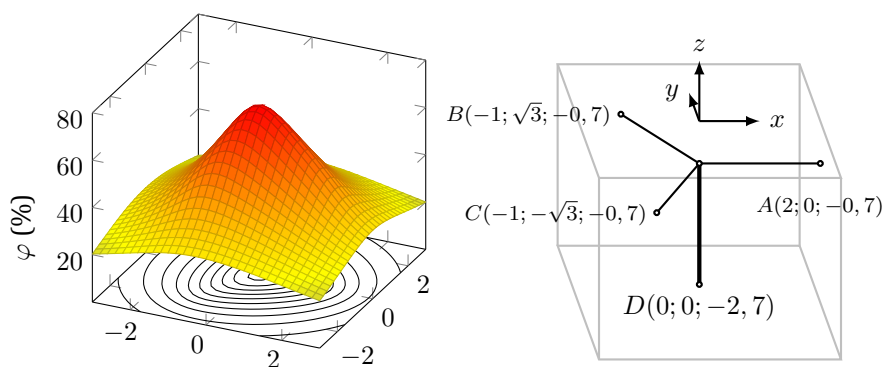
Погонското (работно) заземјување е заземјувањето на дел од струјното коло со што се обезбедува определена функција и/или работна карактеристика на тоа струјно коло.

Работното заземјување може да биде директно или индиректно. Директното заземјување се изведува со непосредно поврзување на заземјувачот односно ЗС. Кај индиректното заземјување поврзувањето со заземјувачот односно ЗС се врши преку некоја импеданција (активна отпорност, индуктивност, капацитивност или нивна комбинација).

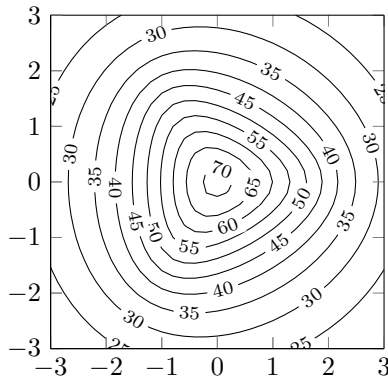
Громобранското заземјување е заземјување на громобранската инсталација и служи за одведување на струјата на атмосферското празнење во земјата. Но притоа громобранското заземјување треба да го ограничи напонот (потенцијалот) на кој што доаѓа громобранската инсталација за време на атмосферското празнење со цел да се спречат можните повратни прескоци од инсталацијата кон електричните кола и металните објекти во нејзината близина.

1.4.2 Карактеристични величини на заземјувачите

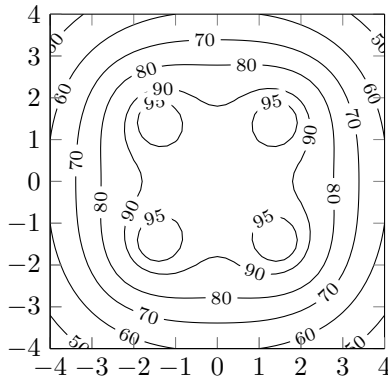
Величините што го карактеризираат еден заземјувач се дефинираат преку струјата I_Z што се одведува од заземјувачот во земјата и преку сликата на потенцијалното поле $\varphi(x, y)$ кое, како последица на одведувањето на струјата I_Z во земјата, се јавува во тлото и на површината од земјата. Сите потенцијали φ се определуваат во однос на „референтната земја„. Референтна или неутрална земја е делот од земјата којшто е доволно оддалечен од заземјувачкиот систем така што при одведувањето на струјата од ЗС на тлото во тој дел од земјата не се појавуваат потенцијални разлики. Потенцијалот на референтната земја ќе го означиме со φ_0 . Обично се усвојува дека е $\varphi_0 = 0$.



Слика 1.4. Потенцијална инка во околината на заземјувач составен од три хоризонтални краци и една вертикална сонда



Слика 1.5. Приказ на еквипотенцијалните линии во околината на заземјувачот од сликата 1.4



Слика 1.6. Приказ на еквипотенцијалните линии по површината од земјата во околината на заземјувач на еден 110 kV аголно-затезен столб

Кога од некој заземјувач се одведува во земјата струја I_Z тогаш доаѓа до подигање на потенцијалите на сите точки од земјата во неговата околина (слика 1.4) а самиот заземјувач, исто така, прима некаков потенцијал φ_Z .

Напонот на заземјувачот U_Z се дефинира како разлика на потенцијалот на заземјувачот φ_Z и потенцијалот на референтата земја φ_0 кога од него се одведува струјата I_Z , т.е.

$$U_Z = \varphi_Z - \varphi_0.$$

Ако усвоиме $\varphi_0 = 0$, што е вообичаено, вака дефинираната вредност на напонот на заземјувачот ќе се совпадне со потенцијалот на заземјувачот φ_Z , т.е. $U_Z = \varphi_Z$.

Отпорноста на распростирање на заземјувачот R_Z претставува единствена карактеристична величина на заземјувачот која што зависи исклучиво од конструктивните особини на заземјувачот и од параметрите на почвата. Таа всушност претставува отпор со кој земјата му се спротивставува на одведувањето на струјата од заземјувачот и практично има чист активен карактер. Се дефинира како однос на потенцијалот φ_Z што заземјувачот го добива при одведувањето на струјата I_Z кон референтната земја и самата струја I_Z , т.е.

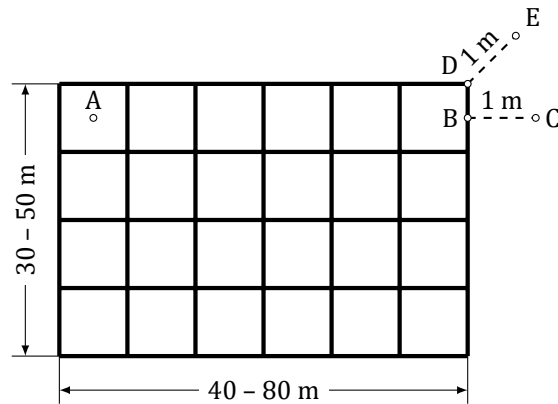
$$R_Z = \frac{\varphi_Z}{I_Z} = \frac{U_Z}{I_Z}. \quad (1.1)$$

Покрај овие две величини во натамошниот дел од текстот ќе се среќаваме и со поимот „импеданција на заземјување“, Z_Z . Тоа е импеданцијата со која посматраниот заземјувачки систем се спротивставува на одведувањето на струјата кон референтната земја. Таа се пресметува како паралелна врска на отпорноста на распростирање на заземјувачот и импеданциите на заземјување на сите други приклучени надземни водови и кабли.

Со импеданцијата на заземјување се опфаќаат и природните заземјувачи кои се наоѓаат надвор од територијата на заземјувачот или се просторно одвоени од него. Тука спаѓаат сите постојни цевководи, водоводи, армирано-бетонски конструкции на објектите (згради, брани и сл.) коишто се вклучени во заземјувачкиот систем. Но со импеданцијата на заземјување се опфаќаат и заземјувачите на соседните постројки и објекти ако со тие објекти постои галванска врска (нпр. галванската врска преку неутралниот спроводник во НН мрежа, врските помеѓу соседните постројки на ТС преку металните плаштови и/или електричните заштити кај енергетските кабли и др.).

Потенцијалната разлика на допир E_d е друга, основна, карактеристична величина со која се карактеризира еден заземјувач. Обично димензионирањето на заземјувачите се врши према оваа величина. Таа претставува потенцијална разлика што постои помеѓу потенцијалот на којшто се наоѓаат заземјените делови од објектот и потенцијалот φ_T на стојната точка (стојалиштето) во неговата близина од која може тој да се допре. При допирот на објектот под дејство на потенцијалната разлика E_d се формира струјно коло, кое се затвора преку раката (рацете), телото на човекот и неговите стопала. Притоа стопалата треба да бидат на хоризонтална оддалеченост од 1 m од објектот. Потенцијалната разлика на допир E_d се дефинира со изразот:

$$E_d = U_Z - \varphi_T. \quad (1.2)$$



Слика 1.7. Изглед на мрежест заземјувач од една 110 kV постројка

каде што φ_T е потенцијалот на стојната точка на површината на земјата од која што може да се допре заземјениот објект или уред.

Очигледно е дека потенцијалната разлика E_d не зависи само од распределбата на потенцијалите по површината од земјата над заземјувачот туку таа зависи и од разместувањето на опремата и деловите од објектот што се наоѓаат на потенцијалот на заземјувачот $\varphi_Z = U_Z$.

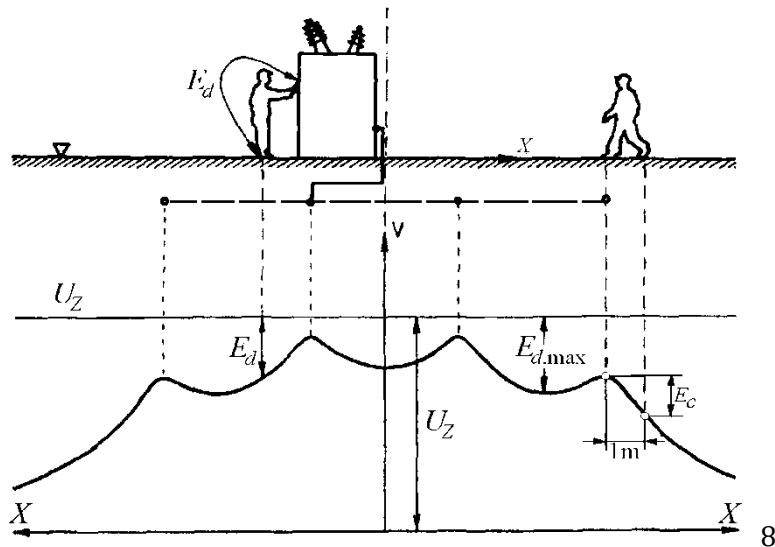
Заземјувачите во разводните постројки или во трансформаторските станици најчесто се изведуваат во форма на хоризонтална мрежа закопана на длабочина $0,7 \div 1$ m под површината на земјата (слика 1.7).

Кога станува збор за димензионирање на ваквите заземјувачи, бидејќи најчесто однапред не е прецизно познат распоредот на опремата и објектите во самата постројка, заради упростување на постапката за нивното димензионирање, таквите заземјувачи се димензионираат според т.н. „максимална потенцијална разлика на допир“, $E_{d,max}$. Величината $E_{d,max}$ се дефинира со помош на релацијата (1.3), како максимална вредност на потенцијалната разлика на допир за целата област над заземјувачот:

$$E_{d,max} = U_Z - \varphi_{T,min}. \quad (1.3)$$

Во релацијата (1.3) со $\varphi_{T,min}$ е означен апсолутниот минимум на потенцијалот на тлото на целата површина од постројката.

Вака дефинирана, потенцијалната разлика $E_{d,max}$ зависи исклучиво од распределбата на потенцијалите на површината од земјата, односно од обликот и димензиите на заземјувачот и од електричните параметри на тлото. Јасно е дека вистинската потенцијална разлика на допир E_d што ќе се има во постројката ќе биде помала од максималната $E_{d,max}$.



Слика 1.8. Распределба на потенцијалите над мрежест заземјувач

Во реални услови таа разлика може да изнесува и неколку десетини проценти, па на тој начин со проектирањето на заземјувачот на база на величината $E_{d,max}$ не само што се задоволуваат прописите, туку се остварува и извесна резерва на страна на сигурноста.

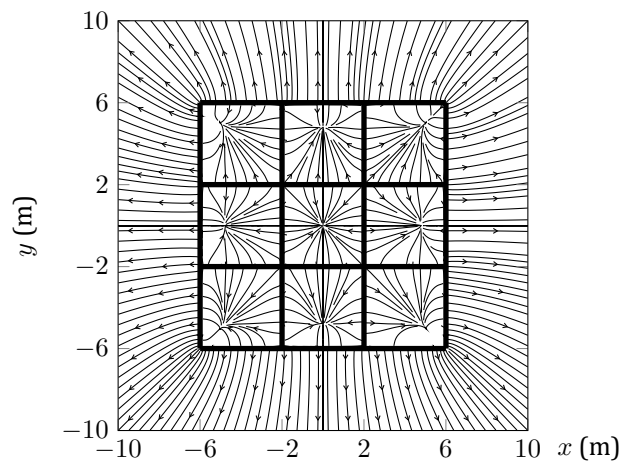
Потенцијалната разлика на чекор E_c е третата карактеристична величина со која се одликува еден заземјувач и преку која, исто така, се врши неговото димензионирање. Таа се дефинира како потенцијална разлика што може на површината од земјата да се премости со чекор чија што должина изнесува 1 m.

На сликата 1.8 е прикажана скицата од еден мрежест заземјувач и распределбата на потенцијалите по површината од земјата по должината на правецот што го преполовува крајното, рабно, поле. По овој правец обично се имаат најголемите потенцијални разлики на допир и чекор. На дијаграмот со распределбата на потенцијалите се прикажани сите карактеристични потенцијални разлики. Потенцијалната разлика на допир ја добива својата максимална вредност $E_{d,max}$ во близината на тежиштето од крајното, аголно, окце, додека потенцијалната разлика на чекор ја постигнува својата максимална вредност во близина на работ на заземјувачот, од надворешната страна.

На сликите 1.9 и 1.10 се прикажани линиите на електричното поле во околината на упростен мрежест заземјувач кој се состои од по 4 хоризонтални и вертикални ленти поставени на растојанија од 4 m.

Имајќи превид дека густината на струјата важи $J = E/\rho$ прикажаните линии ја претставуваат и насоката на течење на струјата.

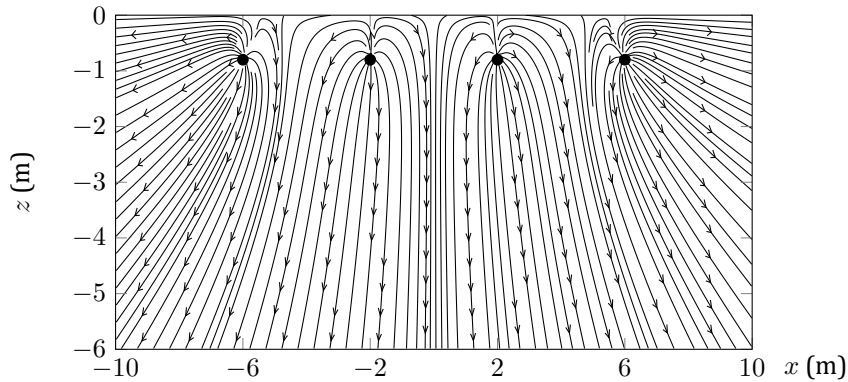
Од сликите се забележува дека линиите секогаш завршуваат под прав агол на елементите на заземјувачот кои се метални еквипотенцијални површини во чија внатрешност јачината на електричното поле е еднаква на нула. Поради тоа, на аглите се забележува искривување на линиите, додека во внатрешноста линиите се поретки што значи дека во тој дел од просторот тече помалку струја. Гледајќи ги линиите во рамнината $x - z$ забележуваме дека колку повеќе се доближуваме до површината на земјата струјата повеќе тече во хоризонтален правец, додека на поголема длабочина таа тече скоро вертикално. Кога би го гледале електричното поле на голема далечина од заземјувачот тоа ќе има облик како и електричното поле од точкест полнеж. Теоретски, линиите на полето завршуваат во бесконечност, што во праксата се изворите на струја (генераторите во електричните центри) кои имаат електричен контакт со разгледуваниот заземјувач преку нивните заземјувачи и земјата помеѓу нив. Деталите за начинот на пресметка на распределбата на потенцијалите во околината на заземјувачите ќе бидат обработени во поглавјето 3.



Слика 1.9. Линии на електрично поле во околината на мрежест заземјувач во рамнината $x - y$

На сликата 1.11 се прикажани некои од можните ситуации за појава на опасност во една постројка со мрежест заземјувач и на сликовит начин се дефинирани одделни поими кои што се однесуваат на тие опасности.

Вистинскиот напон на кој што се изложува човекот при допир, U_d , е секогаш помал од потенцијалната разлика E_d за падот на напон на



Слика 1.10. Линии на електрично поле во околината на мрежест заземјувач во рамнината $x - z$

преодната отпорност R_s тло – стопало поради ограничената површина на самиот контакт. Ако човечкото стопало се замисли дека претставува кружна плоча со еквивалентен пречник $D_s \approx 0,16$ m, тогаш преодната отпорност R_s на стопалото приближно ќе биде:

$$R_s = \frac{\rho_p}{2 \cdot D_s} \approx 3 \cdot \rho_p. \quad (1.4)$$

каде што со ρ_p е означена специфичната отпорност на површинскиот слој на тлото.

За допир како на сликата 1.12а, кога човекот што е изложен на потенцијална разлика на допир стои со составени стопала, преодната отпорност на контактот стопала – тло, R_{pr} , ќе биде двојно помала од преодната отпорност на едното стопало R_s , т.е.:

$$R_{pr} = \frac{R_s}{2} = 1,5 \cdot \rho_p, \quad (1.5)$$

па во согласност со шемата од сликата 1.12б, напонот U_d на кој што ќе биде изложено човековото тело ќе изнесува:

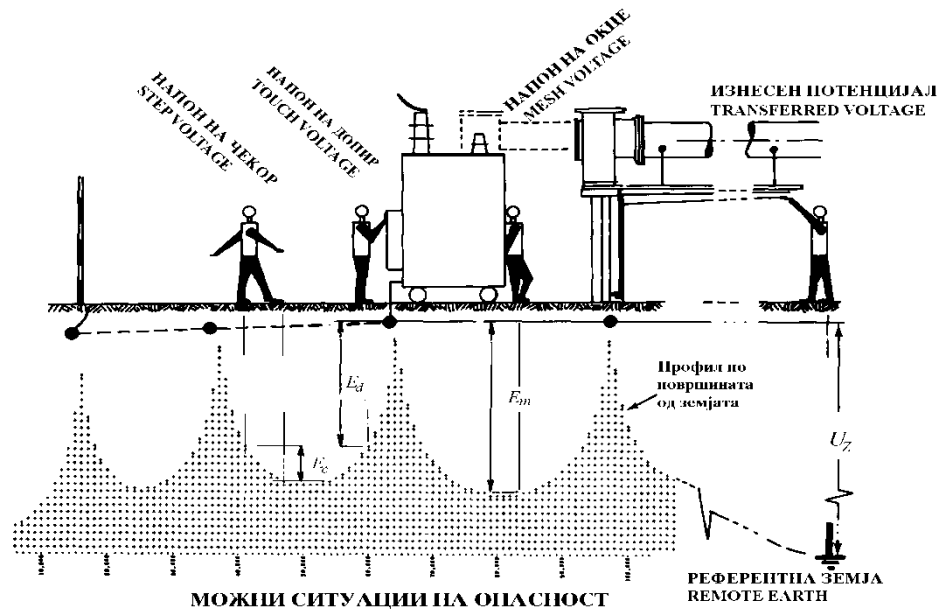
$$U_d = \frac{R_{\xi}}{R_{\xi} + R_{pr}} \cdot E_d = \frac{R_{\xi}}{R_{\xi} + R_s/2} \cdot E_d$$

или

$$U_d = \frac{E_d}{s_d} \quad (1.6)$$

каде што факторот s_d се пресметува со релацијата:

$$s_d = 1 + \frac{R_s}{2R_{\xi}}. \quad (1.7)$$



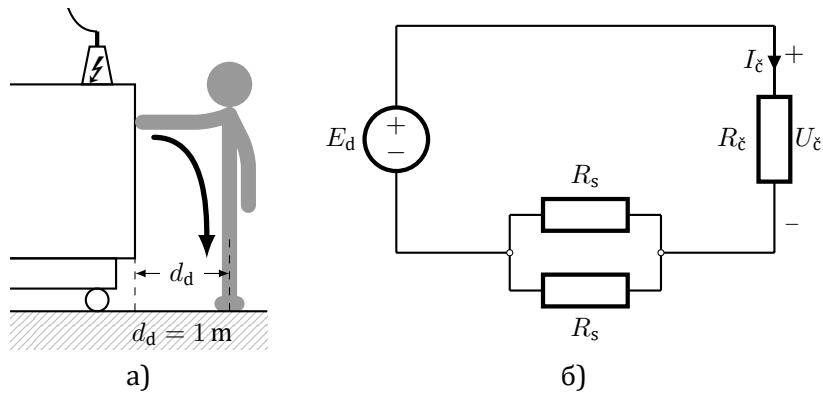
Слика 1.11. Можни ситуации на опасност и некои дефиниции на потенцијалните разлики

Во релацијата (1.7) со R_{ζ} е означен отпорот на човечкото тело на патеката нозе – рака. Вредноста на отпорот R_{ζ} не е константна. Таа е нелинеарна и зависи од струјата, односно напонот на којшто е изложен човекот, но зависи исто така и од состојбата со влажноста на површината од кожата во моментот на изложеноста на напон на допир и варира од човек до човек. Дури и кај едно исто лице, заради промената на влажноста на кожата, отпорот R_{ζ} варира во текот на денот и сезоната. Најчесто се движи во границите од 1000 до 3000 Ω . Обично како меродавна за димензионирањето се прифаќа помалата вредност $R_{\zeta} = 1000 \Omega$, како понеповолна, што дава песимистичка слика за проблемот на ризик и резултати на страна на сигурноста при димензионирањето. Во поново време се прават обиди во пресметките да се внесе стохастички пристап според кој величината R_{ζ} претставува случајна величина која што подлежи на лого-нормалниот закон на распределба, а ризиците се пресметуваат со примена на статистички постапки.

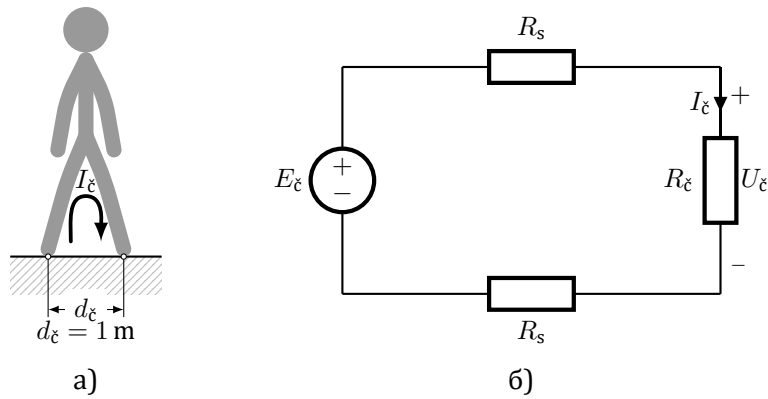
Ако за отпорот на човековото тело R_{ζ} усвоиме $R_{\zeta} = 1000 \Omega$, тогаш, со оглед на (1.4) и (1.7) се добива:

$$s_d \approx 1 + 1,5 \cdot 10^{-3} \cdot \rho_p = 1 + 0,0015 \cdot \rho_p. \quad (1.8)$$

Напонот U_c што ќе се воспостави помеѓу стопалата на човекот кога тој со својот чекор ја премести потенцијалната разлика E_c , во согласност



Слика 1.12. Потенцијална разлика на допир и еквивалентна шема



Слика 1.13. Потенцијална разлика на чекор и еквивалентна шема

со шемата од сликата 1.13, се пресметува со помош на изразот:

$$U_c = \frac{R_\xi}{R_\xi + 2 \cdot R_s} \cdot E_c = \frac{E_c}{s_c},$$

при што факторот s_c со којшто се опфаќа присуството на преодната отпорност на стопалата од човекот ќе биде:

$$s_c = 1 + 2 \cdot \frac{R_s}{R_\xi} \quad (1.9)$$

Ако се земе предвид релацијата (1.4), за $R_\xi = 1000 \Omega$ изразот (1.9) го добива следниот облик:

$$s_c = 1 + 6 \cdot 10^{-3} \cdot \rho_p = 1 + 0,006 \cdot \rho_p. \quad (1.10)$$

1.5 Електричен удар и ефекти од струјата на ударот

1.5.1 Општо

Во електроенергетските и во индустриските објекти како и во домаќинствата луѓето можат да бидат изложени на електричен удар од струја со фреквенција 50 Hz.

За жал струите со оваа фреквенција се и најопасни бидејќи ударите со еднонасочна струја или со високофреквентни струи човекот полесно ги поднесува. Затоа, во натамошните анализи, имајќи го предвид предметот на нашето интересирање, ќе се зборува за дејството на струјата со индустриска фреквенција 50 Hz.

До електричен удар доаѓа кога низ човековото тело протекува струја поради премостување на некоја потенцијална разлика. Најопасни се ударите под дејство на струите кои низ човечкото тело се воспоставуваат на релацијата рака–рака и рака–нога бидејќи тогаш струјата минува низ срцето и низ органите за дишење. Струите што се воспоставуваат на патеката нога–нога се значително понеопасни од претходните. Меѓутоа, од сигурносни причини, во практичните пресметки се смета дека овие струи се подеднакво опасни со претходните.

Последиците од електричниот удар зависат од ефективната вредност на струјата што минува низ човечкото тело I_c и од нејзиното времетраење t .

Врз основа на голем број експерименти, вршени на луѓе и животни, како и на база на реконструкции на голем број несреќни случаи, направена е некаква ориентациона класификација на споменатите дејства на струјата на ударот. Таа е прикажана во табелата 1.1.

Од табелата 1.1 гледаме дека струјниот удар со струја под 10 mA е по правило безопасен бидејќи во тој случај е можно отпуштање на делот под напон, без никакви последици.

Гранични струи на отпуштање. Граничните струи на отпуштање при кои може да дојде до отпуштање на фатениот дел под напон се добиени со бројни експерименти на луѓе. Мерењата покажале дека приближно 90% од мажите можеле да го отпуштат спроводникот при струи помали од 12,5 mA, а 50% при струи помали од 16 mA. Кај жените овие струи изнесувале 8 односно 10,5 mA.

Струите од 10 до 50 mA веќе можат да бидат опасни, толку повеќе колку што се поблиску до горната граница 50 mA. Тоа се должи на фактот што лицето погодено со струјниот удар поради неможноста да се одвои од делот под напон ќе биде изложено на трајно дејствување на струјата. Во тој случај под долготрајното дејствување на струјата доаѓа до

Табела 1.1. Дејство на струјата на ударот врз човекот

I_{ξ} (mA)	Дејство на струјата
< 1	Не се чувствува.
$1 \div 9$	Благи безболни реакции. Можна е управувана контракција на мускулите и отпуштање на делот под напон.
$10 \div 20$	Грчење на мускулите и болки во рацете и градите. Отпуштањето на делот под напон најчесто не е можно. По завршувањето на струјниот удар организмот останува без последици.
$20 \div 50$	Се чувствуваат големи болки и настапува силна контракција на мускулите. Дишењето е отежнато.
$50 \div 100$	Доколку се работи за трајно дејство, можна е и вентрикуларна фибрилација на срцето.
$100 \div 500$	Вентрикуларната фибрилација е мошне веројатна.
> 500	Настануваат изгорници на местото на допирот. Настапува општ мускулен тонус којшто ја спречува појавата на фибрилација.

асфикција, т.е. *малаксаност* и до престанок на дишењето, губење на свеста и смрт.

Но сепак со примена на вештачко дишење и со масажа на срцето веднаш по одвојувањето на настраданиот од напонот тој може да се поврати во живот без последици. Кај подолготрајни струи од редот на 50 mA до губењето на свеста и до гушење доаѓа веќе во текот на првите неколку минути.

Ако струјата на ударот се движи во границите од 50 до 500 mA обично доаѓа до ациклично неконтролирано треперење на залистоците од срцето – појава наречена „*вентрикуларна фибрилација*„. Таа доведува до блокирање на работата на срцето и прекин на циркулацијата на крвта во неговото тело. Бидејќи виталните нервни центри не можат да останат без крв повеќе од неколку минути, тоа ќе доведе до смрт на погоденото лице.

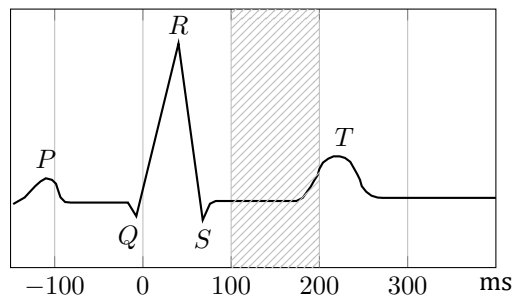
Спонтаното реактивирање на срцето по прекилот на струјниот удар е неизвесно и малку веројатно. Вештачкото дишење и масажата на срцето на местото на ударот обично не помагаат погоденото лице да се реанимира и поврати во живот туку е потребна брза специјалистичка интервенција и дефибрилација на срцето со електрошокови. Бидејќи со

таква опрема обично не се располага на лице место, вентрикуларната фибрилација во практиката најчесто предизвикува смрт.

Но сепак, на лицето што претрпело електричен удар треба во секој случај да му се два вештачко дишење сè до доаѓањето на медицинскиот персонал бидејќи никогаш однапред не може да се знае исходот од дејството на струјата врз погоденото лице.

1.5.2 Критериуми за опасност, ризик, прописи

За утврдување на големината на безопасните струи и ризикот од фибрилација во зависност од големината и траењето на струјниот удар, во разни земји од светот е вршен голем број експерименти на животни, на мртовци и на живи луѓе. Добиените резултати овозможиле да се дојде до повеќе сознанија за природата на електротрауматизмот и да се изведат извесни заклучоци на база на кои подоцна се воспоставени некакви критериуми за опасност.

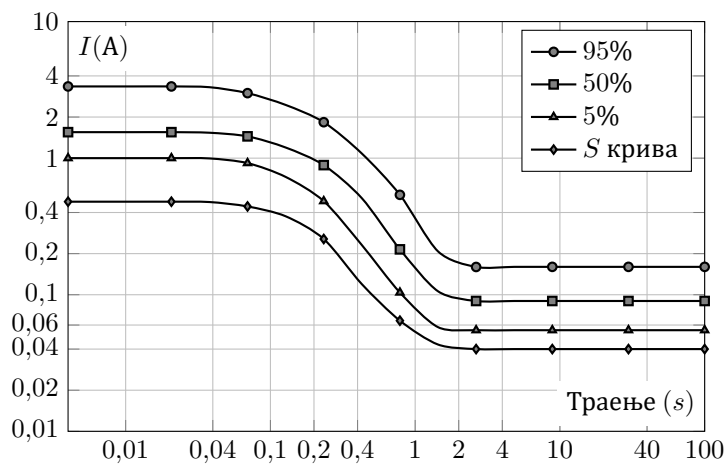


Слика 1.14. Дијаграм на работата на срцето и критична фаза на срцевиот циклус

Така, на пример, утврдено е дека ако траењето на ударот не надминува $1/3$ од должината на траењето на еден срцев циклус (што во просек изнесува околу $0,3$ s), вентрикуларната фибрилација ќе настапи без оглед на големината на струјниот удар под услов до струјниот удар дојде во т.н. S-T фаза на срцевиот циклус (слика 1.14) во која срцето престојува приближно 25% од времето на својата работа. Но доколку времетраењето на струјниот удар е поголемо од $1/3$ од должината на срцевиот циклус тогаш појавата на вентрикуларната фибрилација е неизвесна и веројатноста за нејзината појава ќе зависи од големината и времетраењето на струјниот удар.

1.5.3 Ризик според ИЕС

На сликата 1.15 се прикажани четири криви кои ја даваат зависноста на големината на струјата на ударот од нејзиното времетраење за разни нивоа на ризик (т.е. веројатност) за појава на вентрикуларна фибрилација: 0% ("S" – кривата, наречена крива на сигурност или „Safety curve“); 5%, 50% и 95%. Горната, 95% крива, на пример, ни кажува за кое времетраење t на струјниот удар колкава струја ќе предизвика фибрилација кај 95% од луѓето погодени со ударот.



Слика 1.15. Зависност на ниво на ризик од големината и траењето на струјниот удар

Според предлозите на меѓународната електротехничка комисија (ИЕС) долната S-крива треба да претставува критериум за дозволените струи на електричниот удар. а тој нејзин став е веќе вграден во некои национални стандарди.

1.5.4 Останати критериуми за опасност

Американските прописи тргнуваат од претпоставката дека критична големина за исходот од струјниот удар е количеството топлина што се ослободило во телото на човекот за време на струјниот удар:

$$W = \int_0^t i^2(t) \cdot dt. \quad (1.11)$$

Врз основа на таа претпоставка и на добиените експериментални резултати со стандардот IEEE: Std 80-2000 здружението IEEE го пропишува следниот критериум за дозволената струја на електри-

чнийот удар:

$$I_{\text{doz}} = \frac{K}{\sqrt{t}}; \quad 0,03 \text{ s} \leq t \leq 3 \text{ s}, \quad (1.12)$$

каде што $K = 116 \text{ mA}$ за лица со тежина до 50 kg , додека за лица чија што тежина надминува 70 kg , се зема дека е $K = 150 \text{ mA}$. Американските, руските па и нашите национални прописи базираат на овој модел.

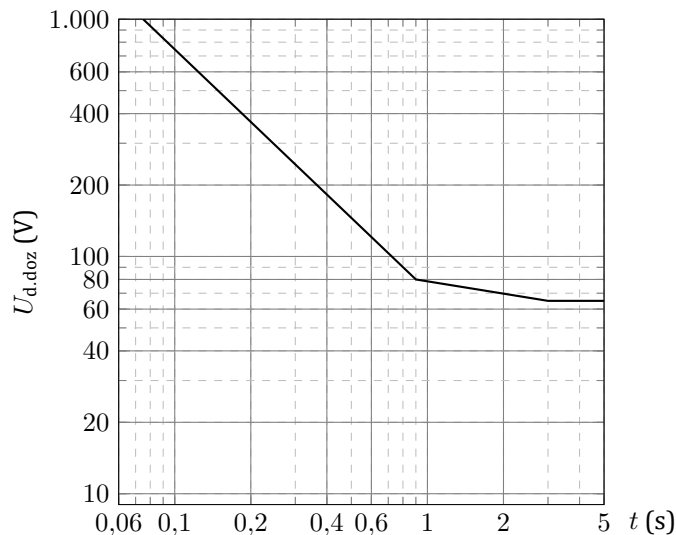
Но други научници, на база на понови сознанија и поинакво тумачење на експерименталните резултати сметаат дека место ослободената топлина, меродавно за опасноста од електричниот удар треба да биде количеството електрицитет што ќе помине низ човековото тело место, според релацијата (1.13):

$$Q = \int_0^t i(t) \cdot dt, \quad (1.13)$$

од каде се добива следниот критериум за дозволен напон на допир и чекор

$$U_{\text{d.doz}} = U_{\text{c.doz}} = \frac{75}{t} (\text{V}). \quad (1.14)$$

Кривите од сликата 1.15 во најголемиот интервал од $0,04$ до 2 s многу добро се совпаѓаат со овој критериум. Германските VDE препораки (слика 1.16), швајцарските прописи, како и прописите на други земји европски исто така се базирани на примената на критериумот (1.13).



Слика 1.16. Дозволен напон на допир според VDE 0141

И прописите на Србија, како и германските, се темелат на примената на критериумот (1.13). Според овие прописи критериумот за дозволен

напони на допир и чекор е ист и го има обликот (1.14). Притоа дозволеният напон не може да биде помал од 65 V ниту пак поголем од 1000 V, т.е. $U_{d.doz} = U_{c.doz} = 65 \text{ V}$ за $t > 1,153 \text{ s}$.

Кривите од сликата 1.15, предложени од меѓународната електротехничка комисија ИЕС, тргнуваат од претпоставката дека големината на струјата I_F која предизвикува вентрикуларна фибрилација претставува случајна величина која подлежи на логонормалниот закон на распределба:

$$\log I_F = \log I_{F50} + 0,18 \cdot N(0,1) \quad (1.15)$$

или

$$I_F = I_{F50} \cdot 10^{0,18 \cdot R_N}. \quad (1.16)$$

Во последните две релации со I_{F50} е означена струјата (A) која ќе предизвика вентрикуларна фибрилација кај 50% од погодените лица, додека $R_N = N(0,1)$ претставува случајна величина со нормална (гаусова) распределба чијашто средна вредност е еднаква на нула и има стандардна девијација еднаква на единица (видете прилог 1).

Притоа како што се гледа од дијаграмот на сликата 1.15, I_{F50} е струјата која всушност одговара на кривата од дијаграмот означена со 50%. Нејзината големина зависи од траењето на ударот t и се пресметува со помош на следните релации:

$$I_{F50} \text{ (A)} = \begin{cases} 1,6 & t \leq 0,1 \text{ s;} \\ 0,16/t & 0,1 \text{ s} \leq t \leq 2 \text{ s;} \\ 0,08 & t > 2 \text{ s.} \end{cases} \quad (1.17)$$

Бидејќи функцијата на распределба $F(x)$ на нормираната нормална распределба $N(0,1)$ е дефинирана со помош на следниот интеграл:

$$F(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot \int_{-\infty}^x e^{-\frac{t^2}{2}} \cdot dt, \quad (1.18)$$

произлегува дека струјниот удар со ефективна вредност на струјата I и со траење t ќе предизвика фибрилација на срцето со веројатност $P = F(x)$ каде што е:

$$x = \frac{1}{0,18} \cdot \log \frac{I}{I_{F50}}. \quad (1.19)$$

Бидејќи интегралот (1.18) не е решлив во затворена форма, определувањето на вредноста на функцијата $F(x)$ обично се врши со примена на готови таблици какви што се табелите од прилогот 1. Изложеново ќе го појасниме на следниот пример.

Пример 1.1. При дефект на електромотор од една работна машина доаѓа до директен спој на куќиштето од машината со дефектната фаза така што таа го добива потенцијалот на фазниот спроводник, т.е. фазниот напон $U_f = U_n/\sqrt{3} = 400/\sqrt{3} = 231 \text{ V}$. Да се оценки колкава е веројатноста P работникот што работел во тој момент со машината и дошол под напон на допир од $U_d = U_f$ да загине од ударот ако осигурувачот којшто го штити моторот од машината прегорува за $t = 0,25 \text{ s}$. Колкав би бил ризикот ако уредот се штити со несоодветно избран (калемен) осигурувач кој ќе прегори за време $t = 1 \text{ s}$. За вредноста на отпорноста на човековото тело во пресметките да се усвои вредноста $R_{\xi} = 1000 \Omega$.

Решение

Најнапред ќе ја пресметаме струјата I што ќе се воспостави низ телото на работникот кој е изложен на електричниот удар:

$$I_{\xi} = \frac{U_d}{R_{\xi}} = \frac{231}{1000} = 0,231 \text{ A}.$$

Потоа, со помош на изразите (1.17) ќе ја пресметаме 50% вредност на струјата која што одговара на времето на исклучување $t = 0,25 \text{ s}$:

$$I_{F50} = \frac{0,16}{t} = \frac{0,16}{0,25} = 0,64 \text{ A}.$$

Понатаму со помош на релацијата (1.19) ја пресметуваме величината x што одговара на овие две струи:

$$x = \frac{1}{0,18} \cdot \log \frac{I_{\xi}}{I_{F50}} = \frac{1}{0,18} \cdot \log \frac{0,231}{0,64} = -2,46.$$

Бидејќи во табелата П.1.1 се дадени податоци само за позитивните вредности на s , најнапред ќе ја пресметаме вредноста $F(-x) = F(2,46)$. Со примена на постапката за линеарна интерполација од оваа табела добиваме:

за $x = x_1 = 2,4$ отчитуваме $F_1 = F(x_1) = 0,99180$ и

за $x = x_2 = 2,5$ отчитуваме $F_2 = F(x_2) = 0,99379$.

Понатаму имаме:

$$F(x) = F(x_1) + \frac{F(x_2) - F(x_1)}{x_2 - x_1} \cdot (x - x_1);$$

$$x = 2,46;$$

$$F(2,46) = 0,99180 + \frac{0,99379 - 0,99180}{2,5 - 2,4} \cdot (2,46 - 2,4) = 0,993.$$

Понатаму, врз основа на релацијата:

$$F(-x) = 1 - F(x), \quad (\text{П.1.1.1})$$

ќе ја добиеме вредноста $F(-2, 46)$:

$$F(-2, 46) = 1 - F(2, 46) = 1 - 0,993 = 0,007, \quad (\text{П.1.1.2})$$

а тоа е всушност бараната веројатност за предизвикување на вентрикуларна фибрилација.

Интегралот (1.18) може да се пресмета нумерички во Matlab со помош на следната функција¹

**Програма 1.1. Нумеричка интеграција
(programi/kaus.m)**

```
1 function F = gaus(x)
2 funkcija = @(t) exp(-t.^2/2);
3 F = integral(funkcija, -1000, x)/sqrt(2*pi);
```

Решението, во овој случај, го добиваме на следниот начин

```
>> F = gaus(-2.46)
F =
    0.0069
```

Според тоа веројатноста да дојде до смрт на работникот под дејство на електричниот удар изнесува само 0,7%.

Размислувајќи на наполно ист начин за случајот кога е времето на исклучување изнесува $t = 1\text{ s}$ се добива: $x = 0,886$; $F(x) = 0,79$. Значи веројатноста за несреќа P во овој случај изнесува 79% и е многу поголема отколку во претходниот случај само заради предолгото траење на струјниот удар.



1.5.5 Осврт кон постојните прописи кај нас и во светот

Со техничките прописи во секоја земја, па и во нашата, се нормираат дозволените вредности на напоните на допир и чекор водејќи сметка не само за времетраењето, туку и за местото каде што настанува струјниот удар. Затоа вредностите за доволените напони на допир и чекор $U_{d.doz}$ и $U_{c.doz}$ се различни за случаите кога се работи за услови на безбедност во и надвор од електричните постројки. Кај нас се во важност техничките прописи (Правилник за техничките нормативи за ЕЕ постројки со номинален напон над 1000 V „Сл. лист на СФРЈ“, бр.

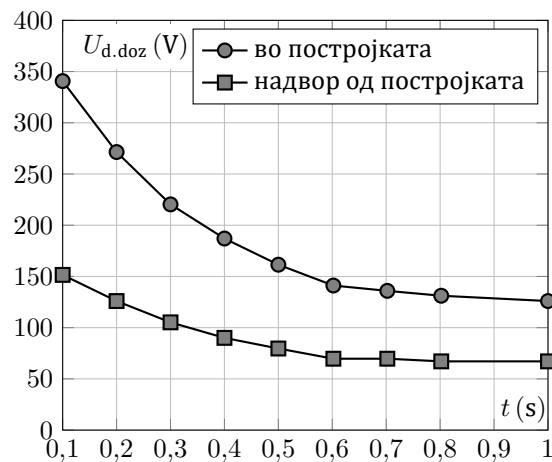
¹Во постарите верзии на Matlab наместо командата `integral` се користи `quadl`.

4/74 и бр. 13/78). Според нив секој заземјувач треба да обезбеди исполнување на следните услови за напоните на допир и чекор:

$$U_d \leq U_{d.doz} \quad (1.20)$$

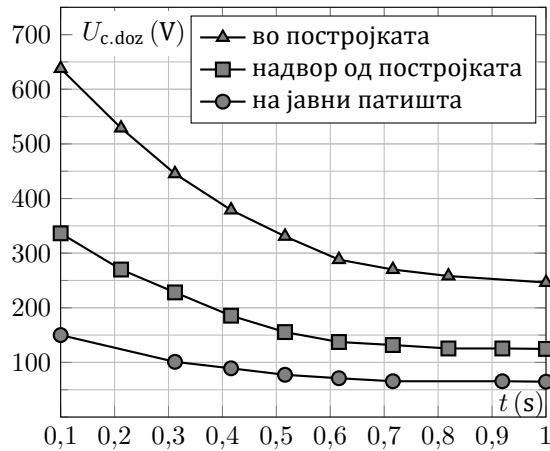
$$U_c \leq U_{c.doz} \quad (1.21)$$

На сликите 1.17 и 1.18 се прикажани дијаграмите на дозволените напони на допир и чекор според нашите, сè уште, важечки прописи. Тие одговараат на некогашните VDE препораки од пред повеќе од 40 години и се базирани на моделот којшто одговара на релацијата (1.17). Оттогаш наваму тие воопшто не се новелирани (како што тоа го направиле скоро сите земји) и покрај тоа што се темелат на сознанијата за електротрауматизмот од пред 40-тина години.



Слика 1.17. Зависност на дозволниот напон на допир од времето на исклучување на делот под напон

Како што се гледа од прикажаните дијаграми, големината на дозволените напони опаѓа со зголемувањето на времето на исклучување на струјата на грешка. Поголеми вредности на напон на допир и чекор (крива а) се дозволени внатре во постројките (каде што се движат луѓе кои работат и ракуваат со опремата и се опремени со технички заштитни средства), отколку надвор од постројките (каде што можат да се движат случајни минувачи или пак животни). Трајниот дозволен напон на допир во постројката, според нашите прописи, изнесува 125 V, а надвор од неа 65 V. Покрај тоа трајниот дозволен напон на чекор во постројките изнесува 250 V, надвор од неа, 125 V, додека на јавни патишта тој изнесува 65 V.



Слика 1.18. Зависност на дозволеният напон на чекор од времето на исклучување на делот под напон

Дозволените напони во овие дијаграми се одредени според времето на реагирање на првиот степен на заштита без да се земе предвид можноста за откажување. Кривите од овие дијаграми се засноваат на повисоката вредност на коефициентот од (1.17), $K = 157 \text{ mA}$, со уважување на низа неповолни околности, така што во нив постои значителна резерва на сигурност.

Кривите на слика 1.17 се нормирани така што да не дозволат не само фибрилатија, туку и паѓање на погодената личност на земја, за да се избегне дополнителното премостување на високи потенцијали при евентуално повторно вклучување. Кај мрежите кај кои не е предвидена операцијата автоматско повторно вклучување (АПВ) овие криви, очигледно, се премногу ригорозни.

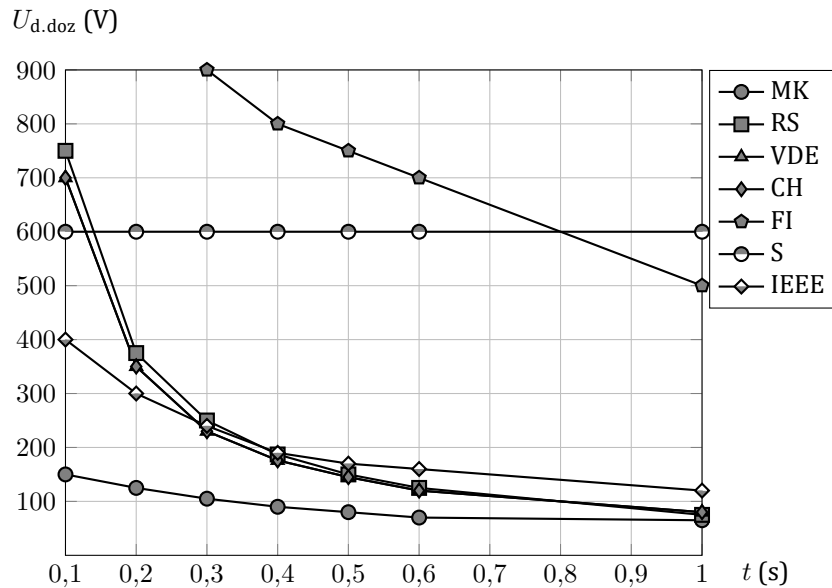
1.5.6 Прописи и препораки кај некои од поразвиените земји во светот

Сите земји во светот ги следат новите сознанија до кои се доаѓа по теориски и експериментален пат и ги вградуваат во своите прописи односно препораки. Така, на пример, нашиот северен сосед (Р. Србија) уште во 1995 ги измени дотогашните важечки прописи кои беа преземени од бившата СФРЈ и кои се кај нас сè уште на сила и го усвои моделот базиран на критериумот (1.17), слично како и германските прописи и прописите на други европски земји. Во прописите и препораките од останатите земји, сообразно со принципите за рационаност и економичност, водејќи притоа сметка и за одржувањето на потребното ниво на сигурност, се оди на нивна

натамошна либерализација. Со поновите верзии од прописите, во кои се вградуваат сите најнови сознанија, во принцип, се допуштаат повисоки вредности на дозволените напони на допир/чекор. На пример, со финските и шведските прописи се усвојува дека отпорот на човековото тело изнесува $R_{\xi} = 3000 \Omega$, а интересно е тоа што високите вредности за $U_{d,doz}$ во табелата 1.2 се резултат на многу високите специфични отпори на површинскиот слој кои се вообичаени за тие земји.

Прописите во САД ги одредуваат дозволените напони на допир и чекор според слични критериуми (како VDE препораките и препораките на Србија), за $R_{\xi} = 3000 \Omega$. Руските нормативи за вредностите на напон на допир се слични како оние во САД, додека пресметки на напонот на чекор не се прават, бидејќи се смета дека напоните на чекор се секогаш помали од напоните на допир.

Дозволените напони на допир $U_{d,doz}$ за времиња до 1 s, според разни прописи, можат да се видат на сликата 1.19. Споредбена анализа на овие приписи во разни земји од светот е направена во табела 1.2.



Слика 1.19. Прописи и препораки за дозволен напон на допир во зависност од времето на исклучување на делот под напон (МК - Македонија, RS - Србија, VDE - препораки на VDE, CH - Швајцарија, FI - Финска, S - Шведска, IEEE - препораки на IEEE)

Табела 1.2. Прописи и препораки за дозволен напон на допир во зависност од времето на исклучување на делот под напон (видете ја легендата од сликата 1.19)

t (s)	MK	RS	VDE	CH	FI	S	IEEE
0,1	150	750	700	700	1600	600	400
0,2	125	375	350	350	1100	600	300
0,3	105	250	230	230	900	600	240
0,4	90	187	176	176	800	600	190
0,5	80	150	145	145	750	600	170
0,6	70	125	120	120	700	600	160
1,0	65	75	80	80	500	600	120

Споредувајќи ги постојните прописи во Р. Македонија со прописите во другите земји, кои се многу полиберални, се доаѓа до заклучокот дека кај нас е неопходно што поскоро ревидирање и иновирање на овие прописи. Тоа без сомнение би довело до ублажување на условите за безбедност особено во делот на малите времетраења на грешката, односно брзо исклучување на релејната заштита.

Пример 1.2. Едноблоковите темели што се применуваат за изведба на 10, 20 и 35 kV надземни водови со челично-решеткасти столбови поради присуството на арматурата во нив претставуваат природни заземјувачи кои можат да се апроксимираат со една полутопка (слика П.1.2.1).

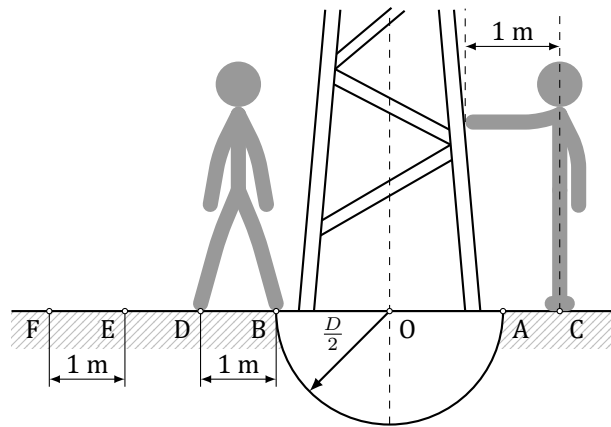
Да се пресмета отпорноста на распростирање R_Z на таквиот заземјувач за случајот кога пречникот на еквивалентната полутопка изнесува $D = 1,5$ m, а земјиштето во која што е таа поставена е хомогено, со специфична отпорност $\rho = 100 \Omega\text{m}$.

Ако струјата на доземен спој изнесува $I_Z = 30$ A колкав ќе биде напонот на заземјувачот и колкави ќе бидат максималните потенцијални разлики на допир и чекор $E_{d,\max}$ и $E_{c,\max}$.

Колкава ќе биде потенцијалната разлика на чекор на која ќе се изложи човек кој со своите стопала ги премостил точките Е и F што се наоѓаат на растојанија $r_E = 4$ m и $r_F = 5$ m и лежат на ист правец. Познато е и $r_C = 1,5$ m.

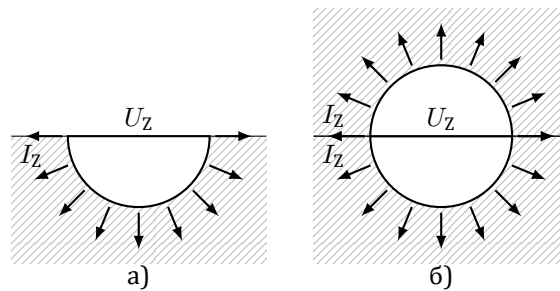
Решение

Според методот лик во огледало, линиите на полето што го создава полутопката на заземјувачот што одведува во земјата струја I_Z , закопана



Слика П.1.2.1. Позиции за одредување на потенцијални разлики на допир и чекор

до половина во земјата (слика П.1.2.2а), нема воопшто да се променат ако целиот простор го исполниме со земја со истата специфична отпорност но истовремено воведеме уште еден ист таков заземјувач, т.е. полутопка, симетрично поставен во однос на рамнината на дисконтинуитетот (површината на земјата), кој ќе одведува иста струја I_z (слика П.1.2.2б). Значи, место да го анализираме полето во земјата што го создава реалниот заземјувач (полутопката), проблемот ќе го решаваме на соодветниот модел (топка со пречник D , поставена во неограничена проводна средина со специфична отпорност ρ , од која што се одведува во земјата вкупна струја $2I_z$, слика П.1.2.2б) што е значително поедноставно. На тој начин ќе се справиме со ограниченоста на земјата и дисконтинуитетот што го воведува воздухот над нејзината површина.



Слика П.1.2.2. Метод со лик во огледало

Кај полето создадено од топка, односно полутопка, постои целосна симетрија во сите правци. Затоа јачината на полето E , густината на

струјата J или потенцијалот φ во сите точки што се наоѓаат на исто растојание r од центарот на топката, ќе бидат исти.

Да посматраме сега една точка што лежи на сферата со радиус r ($r > R = D/2$), концентрична со сферата на заземјувачот. Густината на струјата J во таа точка ќе се добие кога вкупната струја што се одведува од топката во земјата $2I_Z$ ќе се подели со нејзината површина $S = 4\pi r^2$, т.е.

$$J = \frac{2I_Z}{4\pi r^2} = \frac{I_Z}{2\pi r^2}.$$

Бидејќи помеѓу густината на струјата J и јачината на електричното поле E во секоја точка од земјата постои релацијата:

$$J = \sigma \cdot E = \frac{E}{\rho},$$

можеме да пишуваме:

$$E = \frac{\rho \cdot I_Z}{2\pi \cdot r^2}.$$

Ако со φ_∞ ја означиме вредноста на потенцијалот на референтната земја која што се наоѓа во бесконечноста и усвоиме $\varphi_\infty = 0$, тогаш за потенцијалот φ_r на точката што се наоѓа на растојание r од центарот на топката ќе имаме:

$$\varphi_r = \varphi_\infty + \int_r^\infty E(r) \cdot dr = 0 + \int_r^\infty \frac{\rho \cdot I_Z}{2\pi \cdot r^2} \cdot dr = \frac{\rho \cdot I_Z}{2\pi \cdot r}.$$

Тогаш за потенцијалот на точката што лежи на површината од топката ($r = R$), кој е наедно и напонот на заземјувачот U_Z , ќе добиеме:

$$U_Z = \varphi_{r=R} = \frac{\rho \cdot I_Z}{2\pi \cdot R}.$$

Значи отпорноста на распростирање на заземјувач во форма на полутопка со пречник $D = 2R$, закопана во земја со специфична отпорност ρ , ќе биде:

$$R_Z = \frac{U_Z}{I_Z} = \frac{\rho}{\pi \cdot D}.$$

Со замена на конкретните вредности добиваме:

$$R_Z = \frac{\rho}{\pi D} = \frac{100}{\pi \cdot 1,5} = 21,221 \Omega;$$
$$U_Z = R_Z \cdot I_Z = 21,221 \cdot 30 = 637 \text{ V}.$$

Од горните релации произлегува дека потенцијалот φ во точка што се наоѓа на растојание r од центарот на полутопката може да се пресмета и со следната релација:

$$\varphi = U_Z \cdot \frac{R}{r} = U_Z \cdot \frac{D}{2r}; \quad r \geq R.$$

На тој начин за потенцијалите во точките А, В, С, D и Е ќе ги добиеме следните вредности:

$$\begin{aligned}\varphi_A &= \varphi_B = U_Z = 637 \text{ V}; \\ \varphi_C &= 637 \cdot \frac{1,5}{2 \cdot 1,5} = 319 \text{ V}; \\ \varphi_D &= 637 \cdot \frac{1,5}{2 \cdot 1,75} = 273 \text{ V}; \\ \varphi_E &= 637 \cdot \frac{1,5}{2 \cdot 4} = 119 \text{ V}; \\ \varphi_F &= 637 \cdot \frac{1,5}{2 \cdot 5} = 96 \text{ V}.\end{aligned}$$

Потенцијалната разлика на допир што човекот ќе ја премости ако стои на стојното место С, ќе биде:

$$E_{d(C)} = U_Z - \varphi_C = 637 - 319 = 318 \text{ V}.$$

Таа ќе биде наедно и најголемата потенцијална разлика на допир, т.е.

$$E_{d.\max} = E_{d(C)} = 318 \text{ V}.$$

Најголемата потенцијална разлика на чекор ќе се добие помеѓу точките В и D:

$$E_{c.\max} = E_{c(B-D)} = \varphi_B - \varphi_D = 637 - 273 = 364 \text{ V}.$$

Кога е човекот оддалечен од столбот потенцијалните разлики на чекор се помали. Така, на пример, кога човекот со своите стопала ги премостува точките Е и F, потенцијалната разлика на чекор ќе биде:

$$E_c = \varphi_E - \varphi_F = 119 - 96 = 23 \text{ V}.$$

Најголемите напони на допир и чекор на кои може да биде изложен човекот во случајов, значи, ќе бидат:

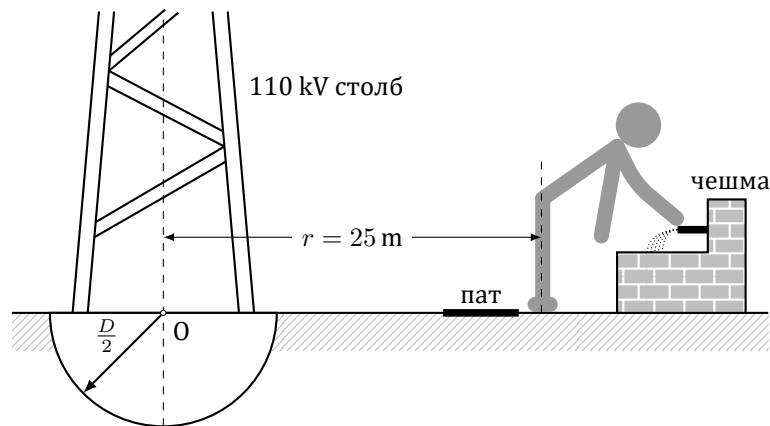
$$\begin{aligned}s_d &= 1 + 0,0015 \cdot \rho = 1,15; \\ U_{d.\max} &= E_{d.\max}/s_d = 318/1,15 = 277 \text{ V}; \\ s_c &= 1 + 0,006 \cdot \rho = 1,60; \\ U_{c.\max} &= E_{c.\max}/s_c = 364/1,60 = 228 \text{ V}.\end{aligned}$$

Гледаме дека и покрај тоа што е $E_{c,max} > E_{d,max}$ сепак, во случајов, се добива дека е $U_{d,max} > U_{c,max}$. Значи, поголема опасност за човекот ќе биде допирот бидејќи во тој случај низ неговото тело ќе протече поголема струја.



Пример 1.3. На растојание $r = 25$ m од оската на столб од еден 110 kV далекувод, покрај самиот пат, се наоѓа чешма за вода (слика П.1.3.1). На сликата е прикажан случај кога човек, кој пие вода од чешмата, е изложен на електричен удар во моментот кога на прикажаниот столб настанува еднофазна куса врска. Вкупната струја на еднофазна куса врска изнесува $I_{K1} = 4,2$ kA, но само дел од неа, поточно само 10,6%, односно $I_Z = 445$ A, се одведува во земјата преку столбот и неговиот заземјувач, додека преостаните 89,4% се одведуваат преку заштитното јаже кон заземјувачите од соседните столбови (видете го примерот 8.1).

Заземјувачот на столбот е од типот В. Тој се состои од 4 стопи со по два хоризонтални правоаголни прстена и од еден заеднички хоризонтален прстен со страница $D_p = 6$ m, кој ги опфаќа сите 4 стопи. Деталниот опис на овој тип заземјувачи е даден во главата 4. Специфичната отпорност на тлото околу заземјувачот изнесува $\rho = 150$ Ω m.



Слика П.1.3.1

Електричното поле што го создава овој заземјувач во својата околина за време на одведувањето на струјата I_Z во земјата, особено на растојанија $r > D_p$, е сосема слично на она создадено од полето на една полутопка со пречник $D = 0,92 \cdot D_p = 5,5$ m (видете го примерот 1.2).

Да се пресмета потенцијалната разлика на допир и напонот на допир на кои ќе биде изложен човекот за време на кусата врска. Колкав ќе биде

ризикот да настапи вентрикуларна фибрилација кај погодениот човек ако се земе дека отпорноста на неговото тело изнесува $R_{\xi} = 1000 \Omega$ и ако се знае дека времетраењето на кусата врска изнесува $t = 0,5 \text{ s}$.

Решение

Отпорноста на распростирање R_Z и потенцијалот U_Z на заземјувачот од погодениот столб за време на земјоспојот ќе бидат:

$$R_Z = \frac{\rho}{\pi D} = \frac{150}{\pi \cdot 5,5} = 8,681 \Omega;$$
$$U_Z = R_Z \cdot I_Z = 8,681 \cdot 445 = 3863 \text{ V}.$$

Потенцијалот φ_r на стојното место на човекот ќе биде:

$$\varphi_r = U_Z \cdot \frac{D}{2r} = 3863 \cdot \frac{5,5}{50} = 425 \text{ V},$$

а тоа ќе биде наедно и потенцијалната разлика на допир, E_d , под претпоставката дека чешмата што ја допира човекот со својата рака има потенцијал на референтната земја $\varphi = 0$

$$E_d = \varphi_r = 425 \text{ V}.$$

Напонот на допир U_d и струјата низ човековото тело I_{ξ} ќе бидат:

$$s_d = 1 + 1,5 \cdot 10^{-3} \cdot \rho = 1,225;$$
$$U_d = \frac{E_d}{s_d} = \frac{425}{1,225} = 347 \text{ V};$$
$$I_{\xi} = \frac{U_d}{R_{\xi}} = \frac{347}{1000} = 0,347 \text{ A}.$$

За да го пресметаме ризикот од појава на вентрикуларна фибрилација, т.е. веројатноста P за настанување на смрт поради струјниот удар, најнапред ќе ја пресметаме 50% вредност на струјата на вентрикуларна фибрилација I_{F50} . Според релацијата (1.17) ќе добиеме:

$$I_{F50} = \frac{0,16}{t} = \frac{0,16}{0,5} = 0,32 \text{ A}.$$

Понатаму, во согласност со релацијата (1.19) имаме

$$x = \frac{1}{0,18} \cdot \log \frac{I_{\xi}}{I_{F50}} = \frac{1}{0,18} \cdot \log \frac{0,32}{0,347} = 0,059,$$

а потоа со користење на функцијата gaus од примерот 1.1 добиваме

```
>> F = gaus(0.059)
F =
    0.5235
```

што значи дека веројатноста е $P = F(x) = 0,524$. Ризикот за настанување на смрт поради настанување на вентрикуларна фибрилација, во случајов, ќе биде 52,4%.

□ □ □

Пример 1.4. Армирано-бетонските столбови за СН и НН, гледано од аспектот на заземјување, се владеат како природни заземјувачи. Бетонот, којшто ја опкружува челичната арматура на столбот, после извесно време откако ќе биде поставен во земјата, прима определен процент влага и станува полупроводен така што специфичната отпорност на бетонот станува блиска до специфичната отпорност на тлото што го опкружува. Во тој случај неговата челична конструкција, наречена арматура, ја добива улогата на заземјувач. Таа може доста добро да се апроксимира со еден вертикално поставен метален цилиндер и покрај тоа што таа претставува решеткаста конструкција.

Се посматра еден таков армирано-бетонски столб од НН надземен вод, поставен во тло со специфична отпорност $\rho = 50 \Omega m$. Должината на делот од столбот, закопан во земјата изнесува $l = 1,6 m$. Пречникот на столбот во основата изнесува 15 cm додека еквивалентниот пречник на металниот цилиндар со кој може да се претстави (еквивалентира) челичната арматура на столбот изнесува $d = 10 cm$. Да се утврди дали постои опасност во случајот на земјоспој (спој на една од фазите со телото на столбот), што претставува доста честа појава кај надземните водови, да дојде до појава на опасни напони на допир и чекор.

Колкава струја I_Z ќе се одведува од темелот на столбот во земјата во тој случај.

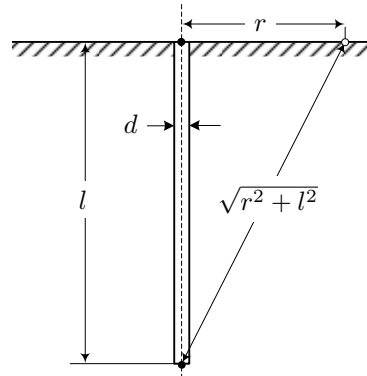
Решение

Може да се покаже дека отпорноста на распростирање на вертикален заземјувач во форма на шипка со кружен пресек со пречник d и должина l (слика П.1.4.1), закопана во земја со специфична отпорност ρ , изнесува:

$$R_Z = \frac{\rho}{2\pi \cdot l} \cdot \ln \frac{4l}{d}.$$

Исто така може да се покаже дека распределбата на потенцијали $\varphi(r)$ на површината од земјата во случајот кога од таквиот заземјувач се одведува струја во земјата I_Z , може да се опише со следната релација:

$$\varphi(r) = \frac{\rho \cdot I_Z}{4\pi \cdot l} \cdot \ln \frac{\sqrt{l^2 + r^2} + l}{\sqrt{l^2 + r^2} - l}, \quad r > d/2, \quad (\text{П.1.4.1})$$



Слика П.1.4.1

каде што со r е означено растојанието од оската на столбот до посматраната точка на површината од земјата.

Во конкретниот случај, за отпорноста на распростирање на заземјувачот ќе имаме:

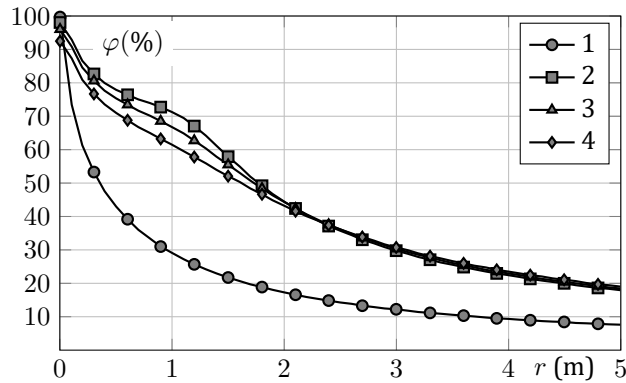
$$R_Z = \frac{\rho}{2\pi \cdot l} \cdot \ln \frac{4l}{d} = \frac{50}{2\pi \cdot 1,6} \cdot \ln \frac{4 \cdot 1,6}{0,1} = 20,685 \Omega.$$

Кога ќе настане земјоспој на столбот, под услов отпорноста на електричниот лак на местото на земјоспојот (т.н. преодна отпорност) да има занемарливо мала вредност, низ столбот ќе протече струјата на земјоспојот (т.н. струја на грешката или струја на доземниот спој) која преку темелот на столбот, кој сега ќе ја игра улогата на заземјувач со отпорност R_Z , ќе се одведува во земјата. Вредноста на оваа струја, под претпоставка дека напонот во тој момент изнесувал $U = U_n = 400 \text{ V}$, ќе биде:

$$I_Z = \frac{U_f}{R_Z} = \frac{U_n/\sqrt{3}}{R_Z} = \frac{231}{20,685} = 11,165 \text{ A.} \quad (\text{П.1.4.2})$$

Струјата I_Z што излегува од заземјувачот и се распростира во земјата во сите правци, ќе воспостави во околината на заземјувачот струјно поле. На површината од земјата исто така ќе постои ова струјно поле и притоа разни точки, зависно од нивната положба во однос на заземјувачот, ќе добијат различни потенцијали. Поради осната симетрија, потенцијалот на сите точки што се наоѓаат на растојание r од оската на столбот ќе биде ист и ќе зависи исклучиво од самото растојание r . Како што беше кажано во задачата, таа зависност во случајов може аналитички да се опише со релацијата (П.1.4.1). Врз

основа на таа зависност е формирана табелата П.1.4.1 и кривата 1 од сликата П.1.4.2. Во нив со φ е означен потенцијалот во разни точки по површината на земјата, изразен во (%) в однос на напонот на заземјувачот U_Z .



Слика П.1.4.2. Распределба на потенцијалите во радијален правец

1. Без прстен за обликување на потенцијалот
2. Со прстен со пречник $D = 2,5$ m закопан на длабочина $h = 0,5$ m
3. Случај кога прстенот е закопан на длабочина $h = 0,7$ m
4. Случај кога прстенот е закопан на длабочина $h = 1$ m

Табела П.1.4.1. Табеларен приказ на зависноста $\varphi(r)$ во околината на столбот

r (m)	φ (%)	r (m)	φ (%)	r (m)	φ (%)	r (m)	φ (%)	r (m)	φ (%)
0,05	100	0,65	39,3	1,25	25,6	1,85	18,8	2,45	14,8
0,15	73,6	0,75	36,1	1,35	24,2	1,95	18	2,55	14,2
0,25	61,4	0,85	33,4	1,45	22,9	2,05	17,2	2,65	13,8
0,35	53,5	0,95	31,1	1,55	21,7	2,15	16,6	2,75	13,3
0,45	47,6	1,05	29	1,65	20,7	2,25	15,9	2,85	12,9
0,55	43	1,15	27,2	1,75	19,7	2,35	15,3	2,95	12,5

Од дијаграмот прикажан на сликата П.1.4.2 за кривата 1 се гледа дека стрмнината на оваа крива е најголема на нејзиниот почеток, во близината на самиот столб. Поради тоа најголема потенцијална разлика на допир ќе се има во точката В која што се наоѓа на растојание 1 m од телото на столбот, додека најголемата потенцијална разлика на чекор ќе се има помеѓу точките А и В. Притоа, во согласност со сликата П.1.4.2,

ќе имаме:

$$\begin{aligned}r_A &= d/2 = 0,05 \text{ m}; \\ \varphi_A &= U_Z = 231 \text{ V}; \\ r_B &= d/2 + 1 = 1,05 \text{ m}; \\ \varphi_B &= \frac{50}{4\pi \cdot 1,6} \cdot \ln \frac{\sqrt{1,6^2 + 1,05^2} + 1,6}{\sqrt{1,6^2 + 1,05^2} - 1,6} = 67 \text{ V (29\%);} \\ r_C &= r_B + 1 = 2,05 \text{ m}; \\ \varphi_C &= \frac{50}{4\pi \cdot 1,6} \cdot \ln \frac{\sqrt{1,6^2 + 2,05^2} + 1,6}{\sqrt{1,6^2 + 2,05^2} - 1,6} = 40 \text{ V (17,2\%).}\end{aligned}$$

Значи максималната потенцијална разлика на допир $E_{d.\max}$ ќе биде:

$$E_{d.\max} = U_Z - \varphi_B = 231 - 67 = 164 \text{ V (71\%),}$$

додека максималната потенцијална разлика на чекор ќе биде:

$$E_{c.\max} = \varphi_A - \varphi_B = 231 - 67 = 164 \text{ V (71\%).}$$

Бидејќи површинскиот слој земја има иста структура како и останатата почва, т.е. $\rho_p = \rho = 50 \Omega\text{m}$, за факторите s_d и s_c , со кои се опфаќа ефектот на преодната отпорност помеѓу стопалата на човекот и површината од земјата, ќе добиеме:

$$\begin{aligned}s_d &= 1 + 1,5 \cdot 10^{-3} \cdot \rho_p = 1,075; \\ s_c &= 1 + 6 \cdot 10^{-3} \cdot \rho_p = 1,3.\end{aligned}$$

Според тоа за најголемите напони на допир и чекор ќе добиеме:

$$\begin{aligned}U_{d.\max} &= \frac{E_{d.\max}}{s_d} = \frac{164}{1,075} = 153 \text{ V (66\%);} \\ U_{c.\max} &= \frac{E_{c.\max}}{s_c} = \frac{164}{1,3} = 126 \text{ V (54,6\%).}\end{aligned}$$

Земјоспоевите на надземните водови понекогаш можат да траат со саати без тие да бидат забележани од работниот персонал. За такви случаи, кога времетраењето на допирот на објектот под напон е 1 с или повеќе, според нашите прописи, дозволената вредност на напонот на допир и чекор изнесува:

$$U_{d.\text{doz}} = U_{c.\text{doz}} = 65\text{V.}$$

Според тоа земјоспојот настанат на еден армирано-бетонски НН надземен столб може да претставува извор на опасност за лицето што

во моментот на земјоспојот го допира столбот. Дури и кога столбот не е допрен, лицето што се наоѓа во опасната зона, во непосредна близина на столбот, на растојание помало од 0,5 m, може да биде изложено на напон на чекор повисок од дозволените 65 V. Но веќе на растојанија од 0,5 m или поголеми, напонот на чекор нема да ја надмине дозволената вредност од 65 V.

Доколку сакаме да ја елиминираме опасноста од превисок напон на допир и чекор (што е особено важно за столбовите поставени во населените места, покрај прометните патишта, објекти и слично), потребно е да се изврши т.н. „обликување на потенцијалот“ во околината на таквите столбови.

Обликувањето се врши со дополнително поставување на еден или два кружни прстена околу столбот со различни дијаметри и различни длабочини на закопување. Кај нисконапонските (НН) столбови сосема е доволно за таа цел да се употреби само еден прстен.

Кога се работи за еден прстен вообичаено е тој да има пречник $D_1 \geq 2$ m и да биде закопан на длабочина $h_1 > 0,5$ m (обично $h_1 = 0,7$ m). Кога, пак, се поставуваат два кружни прстена, тогаш првиот прстен најчесто има параметри $D_1 = 2$ m и $h_1 = 0,5$ m, додека вториот има параметри $D_2 > 4$ m и $h_2 = 0,8 \div 1$ m.

Обично таквите прстени се изведуваат од поцинкувани челични ленти FeZn 30×4 mm \times mm или поцинкувани челични жици со пречник 10 mm ($\Phi 10$) иако во минатото (пред сè заради поголемата трајност) за таа цел сè повеќе се практикувала и употребата на бакарно јаже со пресек Cu35 mm² и покрај тоа што е тоа поскапо решение.

Со поставувањето на овие прстени се постигаат следните цели:

1. намалување на отпорноста на распростирање R_Z и зголемување на струјата на земјоспој со што се зголемува веројатноста таа да биде полесно детектирана и автоматски исклучена од релејната заштита (или заштитата од осигурувачите) и
2. поволно обликување на потенцијалот со што се намалуваат потенцијалните разлики на допир и чекор во околината на столбот.

Ефектот од поставувањето на еден таков прстен од челична лента FeZn 30×4 mm \times mm со пречник $D = 2,5$ m, закопан на некоја длабочина h , е прикажан на сликата П.1.4.2. Кривата 2 се однесува на случајот кога е $h = 0,5$ m, додека кривите 3 и 4 се однесуваат на случаите $h = 0,7$ m и $h = 1$ m.

Пресметките покажуваат дека со поставувањето на таквиот прстен на длабочина $h = 0,7$ m, се постига следното: $R_Z = 8,56 \Omega$; $I_Z = 27$ A; $E_{c,max} = E_{d,max} = 29,4\%$ и $U_d = 63$ V (27%).

Кога длабочината на закопување изнесува $h = 0,5 \text{ m}$, ефектите се слични $R_Z = 8,831 \Omega$; $E_{c.\max} = E_{d.\max} = 27\%$ и $U_d = 58 \text{ V}$ (25%) иако во тој случај се добива незначително подобрување на распределбата на потенцијалите околу столбот.



Пример 1.5. Да се оцени дали е можно елиминирање на опасноста од појава на превисок напон на допир и чекор во случајот разгледуван во примерот 1.3 (кога столбот е без дополнителен прстен) ако на површината од земјата околу него се постави слој од чакал или ситно кршен камен, во форма на круг со радиус најмалку $1,15 \text{ m}$ и со дебелина од најмалку 10 cm .

Решение

Максималните потенцијални разлики на допир и чекор $E_{d.\max}$ и $E_{c.\max}$ и после поставувањето на слојот од чакал ќе останат исти ($E_{d.\max} = E_{c.\max} = 145,5 \text{ V}$). Но сега, после поставувањето на слојот чакал ќе се зголемат факторите s_d и s_c со кои се опфаќа постоењето на преодната отпорност на стопата од човекот кој се наоѓа во опасната зона. Според мерењата вршени на терен ([2]) се утврдило дека специфичната отпорност на површинскиот слој од чакал или од ситен кршен камен, дури и кога е тој влажен, изнесува најмалку $\rho_p = 5000 \Omega\text{m}$. Затоа во тој случај би имале:

$$s_d = 1 + 1,5 \cdot 10^{-3} \cdot \rho_p = 8,5; \quad U_{d.\max} = \frac{E_{d.\max}}{s_d} = \frac{164}{8,5} = 19 \text{ V};$$
$$s_c = 1 + 6 \cdot 10^{-3} \cdot \rho_p = 31; \quad U_{c.\max} = \frac{E_{c.\max}}{s_c} = \frac{164}{31} = 5 \text{ V}.$$

Бидејќи најмалите вредности на дозволените напони на допир и чекор, според нашите прописи, изнесуваат 65 V (дури и кога земјоспојот е траен), произлегува дека со поставувањето на површински слој од чакал или ситен кршен камен во случајов се решава проблемот со опасноста од струен удар.

Инаку ова е една од најефикасните и најчесто користените мерки за намалување на опасностите од превисоки напони на допир/чекор. Се применува секогаш кога е тоа оправдано, т.е. неопходно и можно.

Асфалтирањето на опасната зона околу електроенергетските објекти со слој асфалт чија дебелина изнесува најмалку 2 cm , исто така, претставува ефикасна мерка со која целосно се елиминира споменатата опасност. Мерењата опишани во [2] покажале дека таквиот слој асфалт има практично неограничено голема преодна отпорност, т.е. $\rho_p \rightarrow \infty$.

Но асфалтирањето е скап зафат. Асфалтирањето на 1 m^2 на претходно припремен терен, во просек изнесува околу 10 €/m^2 , а самата припрема на теренот изнесува приближно уште толку. Во разгледуваниот случај, за асфалтирањето на споменатиот круг околу столбот заедно со припремата на теренот ќе бидат потребни околу 100 € , колку што е отприлика цената на самиот столб, додека поставувањето на чакал или кршен камен во слој со потребната дебелина од 10 до 15 cm ќе биде околу 3 пати поевтино.

□ □ □

Пример 1.6. Да ја пресметаме струјата што ќе протече низ човековото тело во случајот кога човекот, кој стои на тло со специфична отпорност $\rho = 100 \text{ }\Omega\text{m}$ премостил потенцијална разлика на допир од $E_d = 318 \text{ V}$. Колкава е веројатноста P во тој случај човекот да настрада под дејство на електричниот удар ако времетраењето на допирот изнесува $t = 0,5 \text{ s}$.

Решение

а) Упростена постапка кога е позната отпорноста на човековото тело R_{ξ}

Струјата I_{ξ} што ќе се воспостави низ човековото тело во случајот кога е тоа изложено на потенцијална разлика на допир E_d ќе биде:

$$s_d = 1 + 0,0015 \cdot \rho = 1 + 0,0015 \cdot 100 = 1,15$$
$$I_{\xi} = \frac{E_d}{s_d \cdot R_{\xi}} = \frac{318}{1,15 \cdot 1000} = 0,2765 \text{ A.}$$

Во последната равенка со R_{ξ} е означена отпорноста на човековото при што е земен најнеповолниот случај кога таа изнесува $R_{\xi} = 1000 \text{ }\Omega$ иако е познато дека таа има вредност која се движи помеѓу 1000 и $3000 \text{ }\Omega$.

Дали е оваа струја опасна по човекот и колкав е ризикот, т.е. веројатноста, таа да предизвика вентрикуларна фибрилација на срцето и смрт поради тоа, ќе зависи во најголема мерка од нејзиото времетраење t , но ќе зависи и од случајот.

Нека со I_{F50} ја означиме вредноста на струјата низ човековото тело која со 50% веројатност би предизвикала вентрикуларна фибрилација кај половината од човечката популација. Тогаш, во согласност со изразот (1.17) ќе добиеме:

$$I_{F50} = \frac{0,16}{t} = \frac{0,16}{0,5} = 0,32 \text{ A.}$$

Понатаму, во согласност со релацијата (1.19) ќе имаме:

$$x = \frac{1}{0,18} \cdot \log \frac{I_{\xi}}{I_{F50}} = \frac{1}{0,18} \cdot \log \frac{0,2765}{0,32} = -0,35253.$$

Бараната веројатност P ќе биде:

$$P = F(x) = F(-0,35253) = 0,3622;$$

што може да се добие од табелите во прилогот П1, применувајќи ја постапката на линеарна интерполација, како во примерот 1.1 или со користење на функцијата `gaus`

```
>> F = gaus(-0.35253)
F =
    0.3622
```

Значи веројатноста да дојде до вентрикуларна фибрилација на срцето од човекот, во случајов изнесува 0,3622 или 36,22%.

Вистинскиот ризик од опасноста е, во практиката, помал бидејќи отпорноста на човечкото тело е обично поголема од $1000\ \Omega$. Ако, на пример, земеме дека е $R_{\xi} = 1500\ \Omega$, што е пореално, со повторување на истата постапка ќе добиеме:

$$\begin{aligned}I_{\xi} &= 0,1927\text{ A}; \\x &= -1,2234; \\F(x) &= 0,1106.\end{aligned}$$

Значи може да се каже дека, во овој случај ($R_{\xi} = 1500\ \Omega$), реалниот ризик е за околу три пати помал од претходно пресметаниот.

Интересно е да се оцени која вредност на потенцијалната разлика на допир е практично безопасна за човекот во овој случај. Нека за безопасна ја прогласиме онаа струја која со веројатност од само 1% може да предизвика смрт поради вентрикуларна фибрилација.

Повторно ќе работиме со претпоставката дека е $R_{\xi} = 1500\ \Omega$, и нека ја утврдиме вредноста на струјата низ човечкото тело која со веројатност од само 1% ($P = 0,01$) може да предизвика вентрикуларна фибрилација. Во тој случај од табелата П.1.2 отчитуваме:

$$x = F^{-1}(1 - P) = F^{-1}(0,99) = -2,32635;$$

а потоа пресметуваме

$$I_{\xi} = I_{F50} \cdot 10^{0,18 \cdot x} = 0,32 \cdot 10^{-0,18 \cdot 2,32635} = 0,122\text{ A}.$$

Потенцијалната разлика на допир E_d што ќе ја протера оваа струја низ човековото тело изнесува:

$$E_d = (R_{\xi} + R_{pr}) \cdot I_{\xi} = (R_{\xi} + 1,5 \cdot \rho) \cdot I_{\xi} = (1500 + 150) \cdot 0,122 = 201\text{ V}$$

додека напонот на допир изнесува

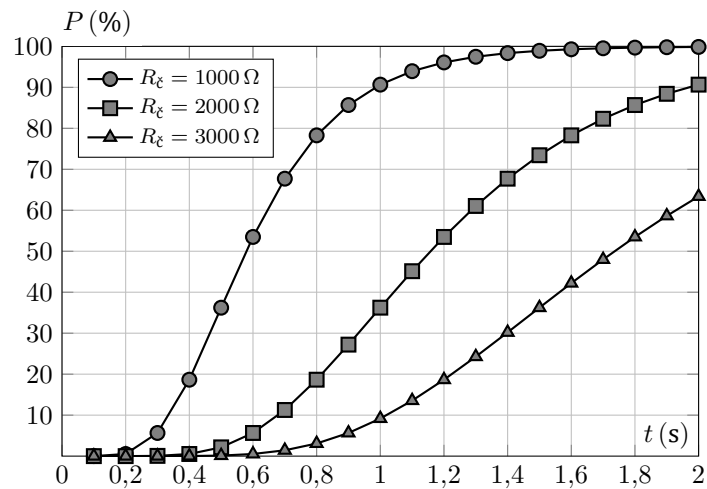
$$U_d = R_{\xi} \cdot I_{\xi} = 1500 \cdot 0,122 = 183\text{ V}.$$

Значи во случајов сите потенцијални разлики на допир под 201 V се практично безопасни за животот на човекот.

За други времиња на траење на допирот t ќе се добијат други ризици. Со повеќекратна примена на изложената постапка, за разни времиња t на допирот при $E_d = 318 \text{ V}$, се добива следната табела.

Табела П.1.6.1. Ризик од појава на вентрикуларна фибрилација во зависност од времетраењето на допирот при $E_d = 318 \text{ V}$

$t \text{ (s)}$	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
$R_{\zeta} = 1 \text{ k}\Omega$	0,00	0,52	5,65	18,65	36,22	53,49	67,71	78,28	85,68	90,66
$R_{\zeta} = 2 \text{ k}\Omega$	0,00	0,00	0,06	0,52	2,14	5,65	11,26	18,65	27,21	36,23
$R_{\zeta} = 3 \text{ k}\Omega$	0,00	0,00	0,00	0,02	0,13	0,52	1,42	3,08	5,65	9,17
$t \text{ (s)}$	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0
$R_{\zeta} = 1 \text{ k}\Omega$	93,94	96,08	97,46	98,35	98,92	99,29	99,53	99,69	99,79	99,86
$R_{\zeta} = 2 \text{ k}\Omega$	45,13	53,49	61,05	67,71	73,43	78,28	82,33	85,68	88,42	90,66
$R_{\zeta} = 3 \text{ k}\Omega$	13,55	18,65	24,27	30,20	36,23	42,21	47,99	53,49	58,63	63,37



Слика П.1.6.1. Зависност на ризикот од времетраењето на струјниот удар

б) Постапка во која се уважува зависноста $R_{\zeta} = f(I_{\zeta})$

Експериментите вршени на живи луѓе покажале дека отпорот на човековото тело, R_{ζ} , меѓу другото, нелинеарно зависи и од големината

на струјата I_{ξ} . Таа зависност може да се искаже со следната релација:

$$R_{\xi} = 750 + \frac{293,3}{\sqrt{I_{\xi}}} (\Omega).$$

Пресметката на струјата I_{ξ} во овој случај, кога е позната потенцијалната разлика на допир E_d , се сведува на решавање на следниот систем равенки:

$$R_{\xi} = 750 + \frac{293,3}{\sqrt{I_{\xi}}}$$
$$E_d = (R_{pr} + R_{\xi}) \cdot I_{\xi}$$

Лесно може да се покаже дека со елиминација на струјата I_{ξ} од една од равенките се добива следната квадратна равенка по непознатата отпорност R_{ξ}

$$R_{\xi}^2 - A \cdot R_{\xi} + B = 0,$$

каде што е

$$A = 2 \cdot 750 + \frac{293,3}{E_d} = 1770,52;$$
$$B = 750^2 - \frac{R_{pr}}{E_d} \cdot 293,3^2 = 521922.$$

Решението на равенката гласи

$$R_{\xi 1,2} = \frac{A \pm \sqrt{A^2 - 4 \cdot B}}{2},$$
$$R_{\xi 1} = 1397 \Omega,$$
$$R_{\xi 2} = 326 \Omega.$$

Од двете решенија ќе го усвоиме првото кое е во опсегот на очекувани вредности. Значи $R_{\xi} = 1397 \Omega$.

Во тој случај за струјата I_{ξ} и напонот на допир U_d се добива

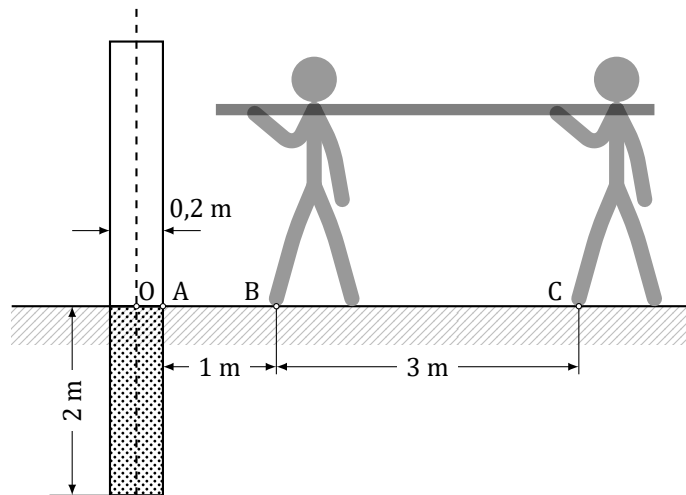
$$I_{\xi} = \frac{E_d}{R_{\xi} + R_{pr}} = \frac{318}{1397 + 150} = 0,206 \text{ A},$$
$$U_d = R_{\xi} \cdot I_{\xi} = 1397 \cdot 0,206 = 287 \text{ V}.$$

Применувајќи ја истата постапка како и во случајот под а), за ризикот во овој случај ќе ја добиеме следната вредност $P = 14,3\%$. Значи уважувањето на зависноста $R_{\xi} = f(I_{\xi})$ дава значително помали ризици.

□ □ □

Пример 1.7. На сликата П.1.7.1 е прикажана положбата на двајца работника кои пренесувајќи метална цевка долга $l = 3$ m, се изложени на струен удар поради тоа што во моментот на настанувањето на земјоспојот се нашле во близината на столбот со земјоспојот во прикажаната положба. Капацитивната струја на земјопој што тече преку темелот на столбот во земјата ($\rho = 100 \Omega\text{m}$) изнесува $I_z = 40$ A. Столбот е армирано бетонски со кружен пресек и со пречник $D = 25$ cm. Должината на делот од столбот закопан во земјата изнесува $L_S = 2$ m, додека железната арматура на столбот има еквивалентен пречник од $D_S = 20$ cm. Да се пресмета:

- а) потенцијалите φ_B и φ_C во стојните точки на двајцата работника;
- б) колкава ќе биде струјата што ќе протече низ телото од секој работник ако се претпостави дека импеданцијата на човековото тело изнесува $R_{\zeta} = 1000 \Omega$.
- в) колкава е веројатноста да настрада секој од работниците поради доживеваниот струен удар ако се знае дека релејната заштита ќе ја исклучи струјата на земјоспојот за $t = 3$ s.



Слика П.1.7.1

Решение

Со постапка слична на онаа од примерот 1.3 се добиваат следните резултати.

Отпорноста на распростирање на столбот (вертикален заземјувач во форма на шипка со кружен пресек со пречник $d = 0,2$ m и должина $l = 2$

m), изнесува:

$$R_Z = \frac{\rho}{2\pi \cdot L_S} \cdot \ln \frac{4L_S}{D_S} = \frac{100}{2\pi \cdot 2} \cdot \ln \frac{4 \cdot 2}{0,2} = 29,355 \Omega.$$

Напонот на заземјувачот (столбот) во тој случај ќе биде:

$$U_Z = R_Z \cdot I_Z = 29,355 \cdot 40 = 1174 \text{ V}.$$

Распределбата на потенцијали $\varphi(r)$ на површината од земјата во случајот кога од таквиот заземјувач се одведува струја во земјата I_Z , може да се опише со следната релација:

$$\varphi(r) = \frac{\rho \cdot I_Z}{4\pi \cdot L_S} \cdot \ln \frac{\sqrt{L_S^2 + r^2} + L_S}{\sqrt{L_S^2 + r^2} - L_S}, \quad r \geq \frac{D_S}{2},$$

каде што со r е означено растојанието од оската на столбот до посматраната точка на површината од земјата. На тој начин потенцијалите φ_B и φ_C во посматраните точки ќе бидат:

$$\begin{aligned} r_A = \frac{D_S}{2} = 0,1 \text{ m}; \quad \varphi_A = U_Z = 1174 \text{ V} (100\%); \\ r_B = \frac{D_S}{2} + 1 = 1,1 \text{ m}; \quad \varphi_B = \frac{100 \cdot 40}{4\pi \cdot 2} \cdot \ln \frac{\sqrt{2^2 + 1,1^2} + 2}{\sqrt{2^2 + 1,1^2} - 2} = 433 \text{ V} (36,8\%); \\ r_C = r_B + 1 = 4,1 \text{ m}; \quad \varphi_C = \frac{100 \cdot 40}{4\pi \cdot 2} \cdot \ln \frac{\sqrt{2^2 + 4,1^2} + 2}{\sqrt{2^2 + 4,1^2} - 2} = 150 \text{ V} (12,7\%). \end{aligned}$$

Значи потенцијалната разлика на која што ќе бидат изложени двајцата работника ќе биде:

$$E_d = \varphi_B - \varphi_C = 433 - 150 = 283 \text{ V} (24,1\%).$$

Бидејќи површинскиот слој земја има иста структура како и останатата почва, т.е. $\rho_p = \rho = 100 \Omega\text{m}$, преодната отпорност на едно човечко стопало ќе биде:

$$R_s = 3 \cdot \rho_p = 3 \cdot 100 = 300 \Omega.$$

Ако усвоиме модел според кој двете стопала на човекот се споени (што е најнеповолен случај) дополнителниот отпор со којшто се опфаќа влијанието на преодната отпорност на стопалата, R_d , ќе биде:

$$R_d = R_s/2 = 150 \Omega$$

Електромоторната сила E_d во контурата формирана од двајцата работника, земјата и металната цевка, ќе протера струја I_ξ која ќе изнесува:

$$I_\xi = \frac{E_d}{2 \cdot (R_\xi + R_{pr})} = \frac{283}{2 \cdot (1000 + 150)} = 0,123 \text{ A.}$$

Понатаму следува постапката за пресметка на ризикот од смрт заради струен удар на работниците, т.е. постапката за определување на веројатноста за настанување вентрикуларна фибрилација. Таа е идентична со онаа спроведена во примерот 1.5. На тој начин добиваме:

$$t > 2 \text{ s}; \quad I_{F50} = \frac{0,16}{t} = \frac{0,16}{2} = 0,08 \text{ A.}$$

Понатаму, во согласност со релацијата (1.19) ќе имаме:

$$x = \frac{1}{0,18} \cdot \log \frac{I_\xi}{I_{F50}} = \frac{1}{0,18} \cdot \log \frac{0,123}{0,08} = 1,506.$$

Бараната веројатност P ќе биде

$$P = F(x) = F(1,506) = 0,935;$$

што значи дека ризикот е 93,5%, т.е. скоро е сосема извесно дека во случајот ќе настрадаат обата работника.

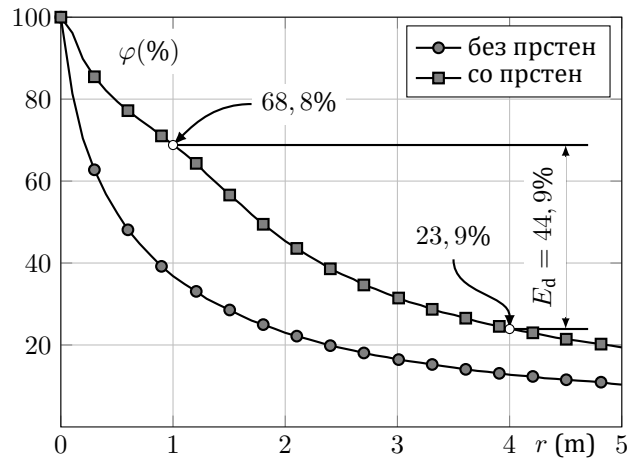
Вистинскиот ризик од опасноста е, во практиката, помал бидејќи отпорноста на човечкото тело е обично поголема од 1000 Ω . Ако, на пример, земеме дека е отпорот на човечкото тело, пресметано според примерот 1.6, изнесува $R_\xi = 1852 \Omega$, што е пореално, со повторување на истата постапка ќе добиеме

$$I_\xi = 70,7 \text{ mA}; \quad x = 0,695; \quad P = F(x) \approx 0,755 (75,5\%).$$

Значи може да се каже дека, во случајов, реалниот ризик е нешто помал од претходно пресметаниот но тој сè уште е премногу голем.

□ □ □

Пример 1.8. Проблемот обработен во примерот 1.7 ($\rho = 100 \Omega \text{ m}$; $R_Z = 29,355 \Omega$; $U_Z = 1174 \text{ V}$; $E_d = 283 \text{ V}$ или 24,1%) да се реши и за случајот кога столбот е снабден со заземјувач во форма на кружен прстен со пречник $D_K = 2,5 \text{ m}$, изработен од поцинкувана челична лента FeZn 30 \times 4, закопана на длабочина $h = 0,7 \text{ m}$. При пресметките да се користат резултатите од сликата П.1.8.1 на која се прикажани зависностите $\varphi(x)$ за случајот кога столбот нема заземјувач (крива 1) и за случајот кога



Слика П.1.8.1

постои прстенестиот заземјувач (крива 2) и кога отпорноста на заземјувањето изнесува $R_Z = 16,095 \Omega$.

Решение

Со решавање на случајот кога столбот е снабден со заземјувач во форма на кружен прстен со зададените карактеристики, на начин којшто ќе биде опишан во третата глава (со примена на програмата *zazem*), се добиваат следните резултати.

$$R_Z = 16,095 \Omega; \quad U_Z = R_Z \cdot I_Z = 644 \text{ V};$$

$$\varphi_B = 443 \text{ V} (68,8\%); \quad \varphi_C = 154 \text{ V} (23,9\%);$$

$$E_d = \varphi_B - \varphi_C = 289 \text{ V}.$$

Понатаму, со примена на постапката од примерот 1.6, добиваме:

$$E_d = 289 \text{ V}; \quad R_{\zeta} = 1000 \Omega; \quad R_s = 3\rho = 300 \Omega; \quad R_d = R_s/2 = 150 \Omega;$$

$$I_{\zeta} = \frac{E_d}{2 \cdot (R_d + R_{\zeta})} = \frac{289}{2 \cdot 1125} = 0,126 \text{ A};$$

$$x = 2,082; \quad P \approx 98\%.$$

□ □ □

Задача 1.1. Да се пресмета ризикот P за настанување на смрт на работниците во примерот 1.7 ако специфичната отпорност на тлото изнесува $\rho = 50 \Omega \text{ m}$.

Одговор

Ако се работи со константна импеданција на човечкото тело $R_{\xi} = 1000 \Omega$ со пресметките ќе добиеме

$$R_Z = 14,678 \Omega; \quad U_Z = 587 \text{ V}; \quad E_d = 142 \text{ V}; \\ I_{\xi} = 61,7 \text{ mA}; \quad x = 0,367; \quad P = 64,3\%.$$

Доколку се уважува зависноста $R_{\xi} = f(I_{\xi})$ како во примерот 1.6, ќе имаме

$$R_Z = 14,678 \Omega; \quad U_Z = 587 \text{ V}; \quad E_d = 142 \text{ V}; \\ R_{\xi} = 2560 \Omega; \quad I_{\xi} = 26,2 \text{ mA}; \quad x = -1,7; \quad P = 4,5\%.$$

што претставува многу пореален резултат.

Задача 1.2. При која капацитивна струја на доземен спој I_Z кај столбот со прстенестиот заземјувач, анализиран во примерот 1.7 ќе се постигне најголемиот напон на допир на столбот да биде еднаков на дозволениот, т.е. $U_d = U_{d.doz} = 65 \text{ V}$. (Одговор: $I_Z = 20,71 \text{ A}$)

2

КАРАКТЕРИСТИКИ НА ТЛОТО И НЕГОВО ВЛИЈАНИЕ ВРЗ КАРАКТЕРИСТИКИТЕ НА ЗАЗЕМЈУВАЧИТЕ

2.1 Специфична отпорност на тлото

Кај повеќето видови заземјувачи се поставуваат доста строги барања во поглед на големината на потенцијалот U_Z и потенцијалните разлики E_d и E_c што тие го добиваат во режимот на одведување на струјата на грешката, така што е неопходно пресметката на неговата отпорност на распростирање R_Z како и оценката на условите за безопасност да бидат изведени што е можно попрецизно.

Како што е познато, отпорноста на распростирање на заземјувачот R_Z е директно пропорционална на вредноста на специфичната отпорност ρ на тлото во кое што е тој поставен. Врз вредноста на специфичната отпорност ρ , пак, во голема мерка влијае количеството на вода содржана во порите на земјата и количеството на солите растворени во таа вода. Всушност може да се каже дека така формиранитиот раствор на солите, кој претставува електролит и кој го исполнува празниот простор помеѓу честичките на земјата, ја спроведува струјата во земјата. Затоа почвите кои имаат голем волумен на пори какви што се, на пример, лапорецот и разните видови глини имаат секогаш мали вредности на специфичната отпорност. Наспроти нив, цврстите компактни стени со мал волумен на порите, какви што се варовникот, еруптивните стени и доломитите имаат мала електрична спроводност т.е. висока специфична отпорност ρ .

Сосема е поинаква ситуацијата кај пропусливите и растресити земјишта какви што се нпр. песокот и чакалот. Кај нив специфичната отпорност ρ , во основа, зависи од присуството и количеството на глина, измешана низ земјиштето. Така, на пример, чистиот чакал, без присуство на глина може да има отпорност $\rho = 2000 \div 6000 \Omega\text{m}$, додека

истиот тој чакал со примеси на глина од 20-тина проценти ќе има тројно помала вредност за ρ .

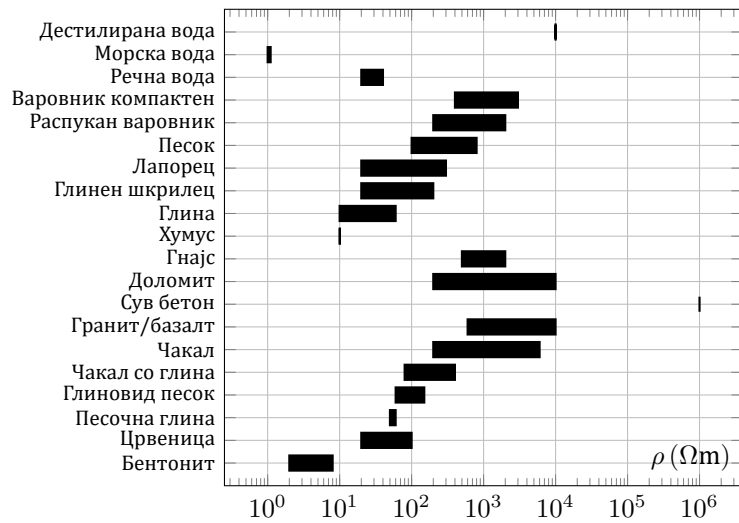
Во табелата 2.1 е даден преглед на вредностите на специфичните отпорности на распростирање на некои средини, а истите се графички прикажани на сликата 2.1.

Табела 2.1. Специфични отпорности на некои почви

Средина	ρ (Ωm)
Дестилирана вода	10000
Морска вода	1
Речна вода	20 ÷ 40
Варовник компактен	400 ÷ 3000
Распукан варовник	200 ÷ 2000
Песок	100 ÷ 800
Лапорец	20 ÷ 300
Глинен шкрилец	20 ÷ 200
Глина	10 ÷ 60
Хумус	≈ 10
Гнајс, метаморфни стени	500 ÷ 2000
Доломит	200 ÷ 10000
Сув бетон	1000000
Гранит/базалт	600 ÷ 10000
Чакал	200 ÷ 6000
Чакал со глина	80 ÷ 400
Глиновид песок	60 ÷ 150
Песочна глина	50 ÷ 60
Црвеница	20 ÷ 100
Бентонит	2 ÷ 8

2.1.1 Влажност на земјата

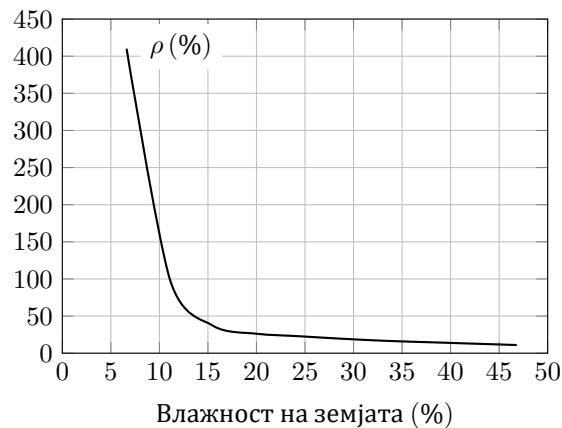
Земјата во која течат струите од заземјувачот е сложена и нехомогена средина како по состав така и по структура. Таа е составена од тврди честички од органско и неорганско потекло и вода. Како што беше речено, спроводноста на земјата во многу зависи од нејзината влажност



Слика 2.1. Специфични отпорности на некои почви

и од нејзиниот хемиски состав. Во сува состојба земјата е слаб спроводник, а со навлажување спроводноста се зголемува.

Во однос на влажноста кај земјата разликуваме три состојби: а) сува, б) влажна и в) смрзната. Состојбите под а) и в) се опасни бидејќи тогаш специфичната отпорност на тлото е најголема. Карактеристиките на земјата во нејзините горни слоеви варираат со промената на неговата температура (годишното време) и дури на длабочина од над 3 m можеме да очекуваме дека тие се стабилни.

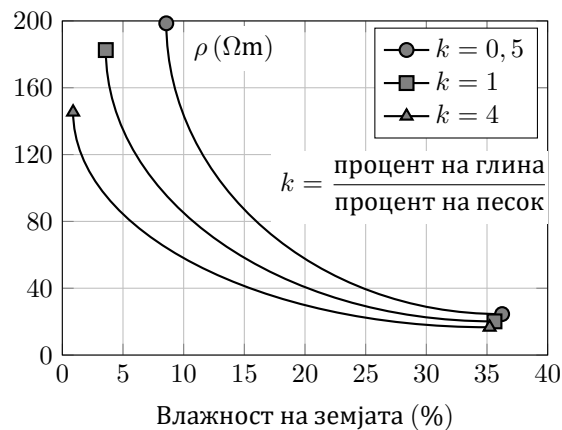


Слика 2.2. Илустрација на зависноста на специфичната отпорност на земјата од нејзината влажност

Специфичната отпорност на земјата доста варира со промената на влагата. Во периодот веднаш после месеците со најголеми врнежи (мај, јуни) специфичната отпорност ρ е најмала, а после месеците со мали врнежи (септември и октомври) таа е најголема.

Зависноста на специфичната отпорност на земјата од нејзината влажност е прикажана на слика 2.2. Како што е видно од сликата, специфичната отпорност ρ ќе биде значително поголема доколку релативната влажност на тлото е под 15 %. За влажност на земјата над 15 % таа е многу помала а промените на отпорноста ρ со промената на влажноста е поблага.

Влажноста на земјата не зависи само од врнежите и подземните води, туку и од структурата на земјата. Колку честичките на земјата се помали, поголемо количество вода се задржува во земјата односно апсорцијата на влага е поголема.



Слика 2.3. Зависност на специфичната отпорност на земјата (смеса од глина и песок) од процентот на влажност

При изведбата на заземјувачите често се среќаваме со ситуацијата кога почвата претставува комбинација од песок и глина. Песокот се состои од полупроводни зрна од кварц со дијаметар $0,2 \div 2$ mm и има слаба способност за задржување на влагата. Глината, пак, има колоидна структура со густо збиени честички од редот 10^{-6} mm и има многу поголема способност за задржување на влагата.

Ако песокот се навлажни ќе се намали неговата специфична отпорност но намалувањето може да биде најмногу до вредноста на специфичната отпорност на водата. Ако, пак, се навлажнат глината или хумусот тогаш доаѓа до создавање на електролит па нивната специфична отпорност станува помала од специфичната отпорност на

водата во кој глината е растворена. Поради ова глината при исти атмосферски услови има помала специфична отпорност од песокот.

На сликата 2.3 е дадена промената на специфичната отпорност на земјата (смеша од глина и песок) во зависност од процентот на влага во земјата.

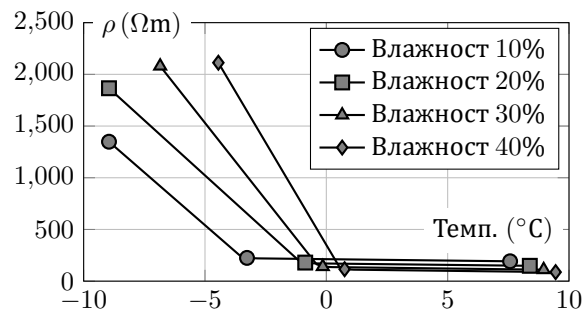
2.1.2 Соленост на земјата

Соленоста на земјата исто така влијае врз вредноста на специфичната отпорност ρ . Некои стручњаци предлагаат ставање на сол околу заземјувачот поради нејзината способност за задржување на влагата во земјата. Доколку процентот на солта во земјата е под 0,5%, тогаш тоа практично не влијае врз намалувањето на специфичната спроводност на тлото. Процентот на сол од 0,5 % до 1 % е област на наглото зголемување на спроводноста на земјата. Понатаму, доколку се продолжи со зголемувањето на соленоста на почвата, отпорноста на земјата ќе продолжи да се намалува, но значително побавно. Концентрацијата на сол над 1% почнува да го нагризува металот во почвата и не се препорачува. Затоа е најдобро да се има соленост на земјата од 0,5 ÷ 1%.

2.1.3 Температурата на земјата

Температурата на земјата е значителен фактор кој влијае врз големината на специфичната отпорност. При иста влажност на земјата со зголемување на температурата отпорноста на земјата се намалува. Со смрзнувањето на земјата (водата) спроводноста на земјата се намалува значително. За да се избегне оваа непожелна појава заземјувачите треба да ги полагаат на длабочина на која земјата не мрзне.

На сликата 2.4 дадена е зависноста на специфичната отпорност на земјата од температурата при различен процент на вода во земјата.



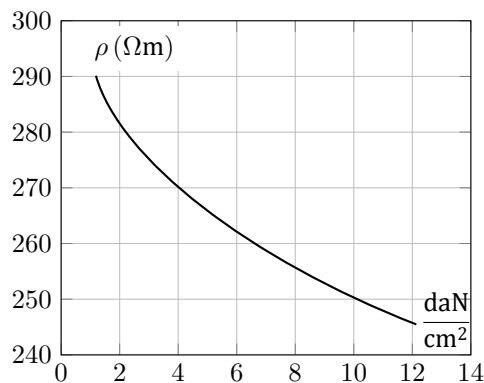
Слика 2.4. Зависност на отпорноста од температурата на почвата

2.1.4 Геолошки состав на земјата

Геолошкиот состав на земјата битно влијае врз нејзината спроводност. Најдобри спроводници на електрична струја се мочуриштата, глината и земја со метална содржина, а најнеповолна е камената подлога. Обично, почвата е составена од повеќе слоеви со различен состав и дебелина, а многу е редок случајот на хомоген состав на земјата.

2.1.5 Набиеност на земјата

Набиеноста на земјата е исто така важен фактор што влијае врз големината на специфичната отпорност на тлото. Имено примерокот земја што ќе го земеме со копање не ни дава вистинска слика за големината на специфичната отпорност затоа што земјата ги менува своите карактеристики во зависност од притисокот врз неа. Под дејство на надворешен притисок се намалува специфичната отпорност на земјата. Ова се објаснува со тоа што со дејствување на надворешниот притисок доаѓа до смалување на просторот (порите) помеѓу поедините честички од земјиштето и со тоа доаѓа до пораст на капиларните сили. Почвата сега задржува поголеми количества вода што доведува до непосредно зголемување на вкупниот активен пресек на водата. Ова е една од причините зошто земјата околу заземјувачот се набива. На сликата 2.5 прикажано е влијанието на притисокот врз специфичната отпорност на земјата.



Слика 2.5. Влијание на притисокот врз специфичната отпорност на земјата

2.2 Мерење на специфичната отпорност на тлото

Отпорноста на распростирање R на еден заземјувач во хомогено тло е пропорционална на специфичната отпорност на тлото ρ , т.е.:

$$R = \mathfrak{K} \cdot \frac{\rho}{100} \quad (2.1)$$

каде што е

ρ специфичната отпорност на тлото изразена во Ωm ,

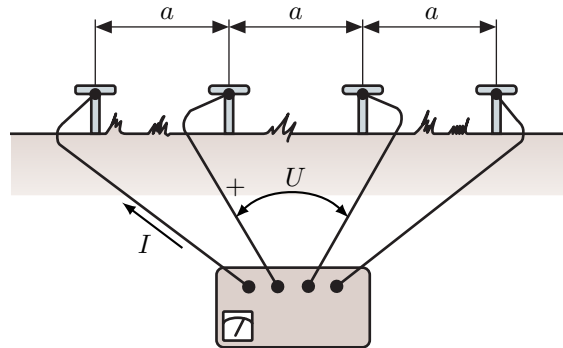
\mathfrak{K} константа на заземјувачот, која е еднаква на отпорноста на распростирање на заземјувачот во хомогено тло со специфична отпорност $\rho = 100\Omega\text{m}$. Таа зависи само од димензиите на заземјувачот и неговиот геометриски облик.

Структурата на тлото најчесто не е хомогена туку слоевита. Дури и во релативно хомогените геолошки структури, кога тлото е составено од еден единствен вид почва, поради различниот степен на порозност (набиеност) и различното количеството на влага во земјата, од локација до локација се можни големи разлики на вредноста на специфичната отпорност на тлото.

Трасите од надземните водови, по правило, минуваат низ терени на кои се менуваат геолошките структури на тлото. Затоа, кога се зборува за заземување на надземните водови, не е можно, ниту пак е правилно, димензионирањето на заземјувачите на столбовите да се врши врз основа на една единствена, просечна, вредност на специфичната отпорност на тлото, проценета преку составот на тлото добиен со увид на лице место по должината на трасата. Потребно е, значи, за секој новопроектиран далекувод, за секое столбно место, или барем за карактеристичните столбни места, со мерење да се утврди вредноста на специфичната отпорност ρ . Истата логика важи и за случајот кога се работи за избор и димензионирање на заземјувач на разводна постројка или трансформаторска станица.

Со мерењето не се утврдува само средната (интегралната) вредност на специфичната отпорност туку и дебелината на одделните слоеви, во случајот кога се работи за хоризонтално услоено тло. Подоцна, со користење на резултатите од овие мерења како и со користење на искуствата од геомеханичките проспекции на тлото што се вршат на одделните столбни места за потребите на димензионирањето на темелите на столбовите, се утврдува подетално геолошкиот состав на тлото.

Мерењето на вредноста на специфичната отпорност ρ во денешно време се спроведува со методи за геоелектрично сондирање. Меѓу



Слика 2.6. Распоред на мерните сонди според Венеровиот метод

најпознатите од нив се Шлумбергеровиот метод (Schlumberger), Венеровиот (Wenner) метод и други.

Еден од најчесто применуваните кај нас, но и во светот, е Венеровиот метод. Тој користи четири мерни сонди: две надворешни, кои се нарекуваат струјни сонди, и две внатрешни, наречени напонски сонди. Распоредот на мерните сонди кај овој метод е како на сликата 2.6 и како што се гледа, тие се поставуваат на еднакви меѓусебни растојанија a . Надворешните сонди се приклучени на струен извор со кој се создава струјното поле во просторот на перспекција, додека внатрешните, напонски сонди, се приклучени на волтметар/галванометар со помош на кој ја мериме потенцијалната разлика помеѓу точките на површината од земјата во кои се забиени напонските сонди. Изворот на струја како и инструментите за мерење на струјата и напонот се обично сместени во еден единствен инструмент. Се мери струјата I што циркулира помеѓу струјните сонди и напонот U помеѓу напонските сонди. Од пресметката на струјното поле следува релацијата (2.1) со која се пресметува вредноста на просечната специфична отпорност на тлото ρ

$$\rho = 2\pi \cdot a \cdot \frac{U}{I} = 2\pi \cdot a \cdot R \quad (2.2)$$

Ознаките кои фигурираат во изразот (2.2) се во согласност со претходниот текст и со сликата 2.6.

Со формулата (2.2) се определува на просечната вредност на специфичната отпорност на тлото ρ на горниот слој со дебелина $h \approx a$. Постапката се повторува поголем број пати, за разни вредности на меѓусебното растојание $a = \{1, 2, 3, 5, 8, 10, \dots\}$ m. На поголеми растојанија ($a > 10$ m) се оди тогаш кога претходните резултати наведуваат на заклучокот дека се работи за исклучително нехомогена

структура на тлото или пак кога намената на мерењата не е само за потребите на димензионирање на заземјувачите туку и за потребите на разните пресметки (на пример влијание на водовите врз другите инсталации во близина на трасата како што се ТТ-водовите, цевководите и слично).

2.2.1 Организација на мерењето

При организирањето на мерењата на специфичната отпорност на тлото ρ редовно се поставува прашањето на колку места и каде да се вршат мерењата на отпорноста ρ . Кога се работи за голем мрежест заземјувач или заземјувач на ТС СН/СН односно СН/НН проблемот со изборот на мерните точки е поедноставен. Теренот на којшто е планирана изведбата на заземјувачот (постројката) се шрафира со растер мрежа и потоа мерењата се вршат во јазелните точки од таа мрежа.

Но кога се работи за заземјување на столбовите од еден надземен вод, проектантите се судираат со прашањето дали мерењата да се вршат на сите столбни места, или пак само на т.н. „репрезентативни“ места долж трасата од водот. Во последниов случај, најнапред, се врши избор на определен број столбни места кои можат со голема сигурност да ја претставуваат геолошката структура на тлото за локалниот дел од трасата што се наоѓа во нивната близина. На тој начин, наместо на секое столбно место, можеме да организираме мерења на секое трето или петто столбно место. Се разбира, така ќе постапиме доколку претходно сме оцениле дека специфичната отпорност на тлото ρ на делот од трасата помеѓу двете соседни мерни места битно не се менува и може со задоволителна сигурност да се процени врз основа на тие мерења.

Вакавата постапка со избор на репрезентативни места долж трасата е најчесто прифатлива. Сепак, во терените со чести промени на меѓусебно битно различни геолошки структури на тлото долж трасата, единствено исправно решение би било мерење на специфичната отпорност на тлото ρ на секое столбно место.

2.2.2 Интерпретација на резултатите

Интерпретацијата на резултатите од мерењата на специфичната отпорност на тлото ρ се состои во аналитичка постапка за определување на бројот, дебелината и специфичната отпорност на секој од слоевите на тлото. Со други зборови, однапред се тргнува од претпоставката дека тлото е хомогено (тоа го правиме тогаш кога со промена на растојанието a , вредноста ρ определена со помош на (2.2) битно не се менува), или

пак дека тоа е хоризонтално услоено, при што најчесто се претпоставува двослојна или трислојна градба на тлото. Иако претпоставката за хоризонтална слоевитост на тлото е доста идеализирана, сепак таа претставува најприфатлива апроксимација на реалните услови што владеат на теренот.

За брза визуелна интерпретација на резултатите од мерењата често се применуваат претходно изготвени номограми, т.е. фамилии на теориски криви за двослојна и трислојна структура на тлото. Сепак, кога се работи за слоевито тло, конечната обработка денес обично се врши нумерички, со помош на компјутер, при што се тргнува од идеализираниот модел на планпаралелна слоевитост на тлото.

2.2.3 Корозиска агресивност на тлото

Корозиската агресивност на тлото зависи од голем број разновидни фактори но, во основа, главни фактори од кои таа зависи се геолошката структура и влажноста на тлото. Постојат и други фактори какви што се нпр. рН вредноста (концентрацијата на водородните јони), аерацијата на тлото, присуството на определени хемикалии во индустриските зони, постоење на лутачки едносточни струи и др. Според резултатите од бројни испитувања и анализи на овој проблем е утврдено дека корозијата е забрзана во глинестите почви, додека во песочните и чакалестите почви таа ќе се одвива успорено.

Како глобален показател за корозивната агресивност на тлото може да послужи вредноста на специфичната отпорност на тлото. Генерално може да се каже дека тло со специфична отпорност $\rho < 20 \Omega\text{m}$ е силно агресивно, додека пак тлото со отпорност $\rho > 60 \Omega\text{m}$ е слабо агресивно.

Брзината со која ќе кородира заземјувачот не зависи само од корозиската агресивност на тлото туку и од употребениот материјал за заземјувачот. Така, на пример, бакарот кој е електрохемиски позитивен (неговиот електрохемиски потенцијал изнесува $+0,377 \text{ V}$) ќе има изразита предност пред непоцинкуваното железо ($-0,44 \text{ V}$) или пред цинкот, односно поцинкуваното железо ($-0,763 \text{ V}$). Затоа во алувијалните подрачја со мала специфична отпорност и висока влажност како материјал за изведба на заземјувачите често се користи бакарно јаже.

Векот на траењето на поцинкуванкуваните челични ленти, кои во практиката најмногу се користат, зависи во најголема мера од квалитетот на самото поцинкување. Во таа смисла е утврдено дека добро поцинкуваната челична лента во почви со нормална корозиска агресивност е сосема рамноправна со бакарното јаже. Лошо поцинкуваната лента или пак лентата кај која поради лоша

манипулација при транспортот и полагањето или поради несоодветното спојување дошло до оштетување на цинковиот заштитен слој може да има сосема мал век на траење - во влажно тло само неколку години.

2.2.4 Материјали за изработка на заземјувачите и видови заземјувачи

Заземјувачите на електроенергетските објекти најчесто се изработуваат од поцинкувано калено железо, бакар, пооловено и побакарено железо, а во некои случаи се применуваат и други материјали (лесни материјали). Заземјувачите од железо треба да имаат поголем пресек и поголема дебелина поради нестабилноста на железото во земја (влијание на хемиски отпадоци и хемиски производи) бидејќи доаѓа до негова корозија и со тоа се скратува неговиот век. Ова особено се однесува на челичните јажиња кај кои поради големата допирна површина со земјата и продирањето на влага во внатрешноста на жилите, корозијата е зголемена.

Зависно од средината во која се положуваат заземјувачите (чиста, сува влажна, агресивна) брзината на појава на корозија ќе биде различна. Содржината на гасовите O_2 , SO_2 , CO_2 во тлото ја забрзуваат и помагаат корозијата на поцинкуваното железо и со тоа му го скратуваат животниот век. Ако тенкиот слој цинк е нагрizen и некавалитетен, тогаш заземјувачот брзо ќе биде уништен бидејќи незаштитеното железо ќе кородира само за неколку години.

Бакарот е значително поотпорен но и и поскап материјал. Поради неговата хемиска стабилност, понекогаш му се дава предност во однос на другите материјали. Бакарните спроводници најчесто се користат за заземјување во постројките за висок напон. При нивното галванско спојување со железни, оловни или поцинкувани спроводници доаѓа до појава на галвански елемент кој создава струја која тече во земја и притоа доаѓа до слабеење на површината на спроводникот, а може да доведе и до прекин на спојот.

Лесните метали и пооловените метали се користат само во определени случаи кога не може да се употребат горе наведените метали што е случај при разни хемиски влијанија, но се препорачува да не се користат истите без претходно проучување на околностите поради кои би се одлучиле за нивна примена. Ако употребиме заземјувачи од лесни материјали, нивните електрични и механички особини треба да соодветствуваат на особините на спроводниците од бакар, изнесени во табелата 2.2.

Општо земено, елементите (електродите) од кои се изведуваат заземјувачите може да бидат: плочи, цевки, ленти, јажиња и разни

профили во зависност од тоа што ни стои на располагање и каква отпорност на заземјување сакаме да постигнеме.

Во нашата практика најчесто се применуваат хоризонталните и вертикалните заземјувачи. Кај надземните водови најмногу се применуваат хоризонталните заземјувачи додека вертикалните заземјувачи (сонди) се користат многу поретко, и тоа само во случаите кога земјата е слоевита и кога долните слоеви имаат значително помала специфична отпорност во однос на горниот слој. Вертикалните заземјувачи кај столбовите се применуваат и тогаш кога просторот околу самиот столб за изведба на заземјувачот е многу ограничен.

Вертикалните заземјувачи многу почесто се применуваат кај големите мрежести заземјувачи на ТС ВН/ВН и ТС ВН/СН и кај заземјувачите на ТС СН/НН. Се изведуваат најчесто со помош на челични цевки со должина $2 \div 5$ m, или пак со аголно железо (L, U или T профил).

Хоризонталните заземјувачи најчесто се изведуваат од поцинкувани челични ленти или пак од поцинкувано валчесто железо, а во некои случаи се применува и бакарно јаже.

Табела 2.2. Најмали дозволени пресеци на елементите од заземјувачите, според Правилникот [11]

Материјал: Поцинкуван челик
Лента со пресек 100 mm^2 со дебелина најмалку 3,5 mm
Тркалезен челик со пречник 10 mm
Цевка со пречник 38 mm и дебелина не помала од 3,5 mm
Аголник $65 \text{ mm} \times 65 \text{ mm} \times 7 \text{ mm}$
Профил U 6,5 односно T 6 или други соодветни профили
Материјал: Бакар
Лента со пресек 50 mm^2 но не потенка од 2 mm
Јаже со пресек 35 mm^2
Цевка со пречник 30 mm, со дебелина не помала од 2,5 mm

Заради заштита од корозија во текот на експлоатацијата како и заради заштита од термичко преоптоварување во режимот на куса врска односно земјоспој, пропишани се минималните вредности на пресеците на заземјувачите од надземните водови (табела 2.2). Во поглед на изборот на материјалите за изведба на заземјувачите на столбовите во услови кога поради агресивноста на тлото е можна нивна засилена

корозија, прописите не даваат посебни критериуми, освен препораката, гореспоменатите пресеци да се зголемат за околу 50% кога станува збор за непоцинкуван или лошо поцинкуван челик (железо).

3

МОДЕЛИРАЊЕ НА ЗАЗЕМЈУВАЧИТЕ СО ПОМОШ НА КОМПЈУТЕР

3.1 Општо

3.1.1 Основна задача на проектирањето на заземјувач

Основна задача при проектирањето и димензионирањето на заземјувачите е

- при однапред позната (дефинирана) струја на одведување I_Z ,
- при однапред позната специфична отпорност на земјата ρ и
- при однапред познато времетраење на струјата на грешка t ,

да се направи оптимален избор на заземјувач.

Таквиот заземјувач ќе треба, од една страна, да ги задоволи техничките ограничувања дефинирани со мерките за безбедност (напоните на допир и чекор да бидат во дозволените граници), а од друга страна заземјувачот треба да биде економичен, т.е. да бидат потребни минимални инвестиции за неговата изведба.

Значи, изборот и димензионирањето на заземјувачите претставува сложена техничко-економска задача чие решение се состои во многукратно експериментирање со разни конфигурации на заземјувачот. Притоа во секој таков експеримент ќе треба да се реши заземјувачот.

3.1.2 Решавање на заземјувач

Да се реши еден заземјувач, значи да се определи отпорноста на распростирање R_Z , да се пресмета распределбата на потенцијалите $\varphi(x, y)$ по површината на земјата во неговата непосредна близина, и по можност, да се пресметаат фреквентните хистограми на потенцијалните разлики на чекор/допир, а со тоа да се добијат нивните максимални, минимални и просечни вредности.

3.1.3 Начини за решавање и анализа

Постојат неколку начини на кои може да се реши овој проблем:

- со директни мерења на терен,
- со експериментирање на модели во лабораторија (електролитичка када) и
- со пресметки.

Во денешно време, со развојот на компјутерската техника и нејзната нагла примена, сè повеќе се применуваат компјутерските пресметки додека експерименталните методи се практично исфрлени од употреба за таква намена. Веќе се развиени математички модели со кои, по пресметковен пат, се добиваат резултати со многу висока точност.

Постојат повеќе нумерички постапки за решавање на заземјувачите кои служат за пресметување (или проценка) на карактеристиките на заземјувачите

- потенцијален метод,
- методот на парцијални површини,
- други.

Повеќето од нив базираат на теоријата на полето и ја користат формалната аналогија што постои помеѓу основните равенки кај електростатичкото и кај стационарното струјно поле.

За брзи ориентациони пресметки често се користат и емпириски формули, но за добивање целосни резултати со поголема точност е потребно да се користи некој нумерички метод. Како најточен од сите горе спомнати методи се смета потенцијалниот метод.

Кога се работи за сложени заземјувачи составени од голем број елементи (електроди) во форма на ленти, цевки, јажиња и сл. чија вкупна должина не надминува 200 m, најпогоден е методот опишан во наредниот дел.

Точноста на овој метод е особено висока кога заземјувачот може да се прикаже како множество од праволиниски елементи чии должини се значително поголеми од нивните напречни димензии.

Моделот не внесува ограничувања во поглед на димензиите и геометријата и прифаќа било каква заемна положба на неговите елементи во просторот.

Претпоставки

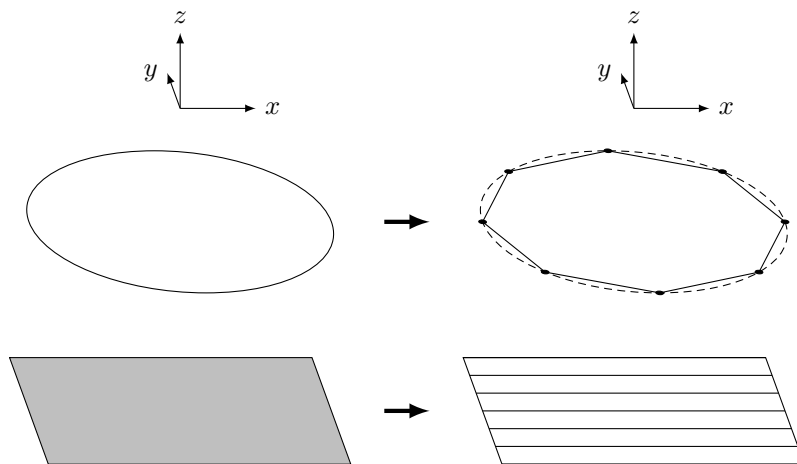
При решавањето на заземјувачите се воведуваат следните претпоставки:

- Заземјувачот се состои од n праволиниски елементи-спроводници кои што се меѓусебно галвански поврзани;
- Заземјувачот е поставен во неограничена хомогена средина со позната специфична отпорност ρ .

- Исто така ќе претпоставиме дека должината на елементите е доволно мала така што може да се занемарат падовите на напони во нив и може да се смета дека сите n елементи од заземјувачот се наоѓаат на ист потенцијал.

Последната претпоставка кај реалните заземјувачи е во основа задоволена за должини на елементите до 200 m, што во реалноста е практично секогаш исполнето бидејќи димензиите на реалните заземјувачи ретко кога (освен во некои специјални случаи) ја надминуваат оваа димензија.

Неправолиниските елементи на заземјувачот секогаш може, со задоволителна точност, да се претстават т.е. се моделираат со неколку праволиниски сегменти. Така, на пример, пресметките покажуваат дека кругот може сосема успешно да се замени со еден правилен m -тоаголник при што за $m = 8$ грешката во моделирањето е од редот на големина на 1%.



Слика 3.1. Разни начини за моделирање на заземјувачите

3.2 Струјно поле на заземјувач. Општи Максвелови равенки

Посматраме заземјувач којшто се состои од n електроди. Нека претпоставиме дека од сите n електроди течат струи на одведување во земјата и нека со $I_1, I_2, \dots, I_k, \dots, I_n$ – соодветно, ги означиме тие струи. Тогаш потенцијалот на секој од елементите (електродите), според принципот на суперпозиција, ќе биде еднаков на збирот од парцијалните потенцијали кои настануваат поради струите на одведување од секоја од електродите. Применувајќи го овој принцип,

врз основа на познатите *Максвелови равенки*, потенцијалот φ_k , на k -тата електрода ќе биде

$$\varphi_k = r_{k1}I_1 + r_{k2}I_2 + \dots + r_{kk}I_k + \dots + r_{kn}I_n = \sum_{j=1}^n r_{kj}I_j. \quad (3.1)$$

Коефициентите r_{kj} во (3.1) со исти индекси се викаат сопствени, а оние со различни индекси, меѓусебни отпорности.

За секој елемент од заземјувачот може да се напише по една равенка од обликот (3.1), со што се добива систем од n такви равенки.

Бидејќи сите електроди се елементи на еден заземјувач, т.е. тие се заемно галвански поврзани, ако ги занемариме падовите на напон во самите електроди нивните потенцијали ќе бидат приближно еднакви меѓу себе, и еднакви на напонот на заземјувачот U_Z :

$$\varphi_1 = \varphi_2 = \dots = \varphi_k = \dots = \varphi_n = U_Z. \quad (3.2)$$

Во тој случај Максвеловите равенки за сложен заземјувач составен од n елементи, ќе бидат

$$\begin{aligned} U_Z &= r_{11}I_1 + r_{12}I_2 + \dots + r_{1n}I_n, \\ U_Z &= r_{21}I_1 + r_{22}I_2 + \dots + r_{2n}I_n, \\ &\vdots \\ U_Z &= r_{n1}I_1 + r_{n2}I_2 + \dots + r_{nn}I_n. \end{aligned} \quad (3.3)$$

Равеките (3.3) кои даваат врска помеѓу напонот на заземјувачот према референтната земја и струите што се одведуваат од неговите елементи можат да се напишат и во матрична форма

$$\mathbf{E} \cdot U_Z = \mathbf{r} \cdot \mathbf{I}. \quad (3.4)$$

Во матричната равенка (3.4) одделните величини го имаат следното значење

U_Z напон на заземјувачот спрема референтната земја;

\mathbf{E} вектор (матрица колона) со димензии $n \times 1$ составен од единици,

$$\mathbf{E} = [1 \ 1 \ \dots \ 1]^T;$$

\mathbf{r} квадратна матрица со димензии $n \times n$ на сопствените и меѓусебните отпорности на елементите од заземјувачот;

\mathbf{I} вектор со димензии $n \times 1$ на струите коишто се одведуваат од елементите на заземјувачот во земјата, $\mathbf{I} = [I_1 \ I_2 \ \dots \ I_n]^T$.

Матрицата \mathbf{r} е симетрична бидејќи за секој нејзин вондијагонален елемент важи $r_{ij} = r_{ji}$.

Меѓусебната отпорност на елементите i и j се дефинира како однос помеѓу потенцијалот φ_j што го добие елементот j под влијание на струјата на одведување I_i од елементот i :

$$r_{ij} = \frac{\varphi_j}{I_i}. \quad (3.5)$$

Сопствената отпорност r_{ii} на елементот i се дефинира како однос на потенцијалот на елементот i на кој тој ќе дојде под дејство на сопствената струја на одведување I_i . Според оваа дефиниција, сопствената отпорност r_{ii} всушност претставува отпорност на распретирање на елементот i

$$r_{ii} = \frac{\varphi_i}{I_i}. \quad (3.6)$$

Сопствените и меѓусебните отпорности на елементите од заземјувачот, дефинирани на ваков начин, се определуваат под претпоставката дека другите елементи од заземјувачот, освен посматраниот пар елементи, не постојат. Со тоа се воведува некаква грешка во пресметките но анализите покажуваат дека таа грешка е занемарливо мала.

Сумата на струи што се одведуваат од одделните елементи на заземјувачот е еднаква на вкупната струја I_Z што се одведува од заземјувачот во земјата:

$$I_Z = \mathbf{E}^T \cdot \mathbf{I}. \quad (3.7)$$

Ако матричната равенка (3.4) ја помножимо од левата страна со инверзната матрица $\mathbf{y} = \mathbf{r}^{-1}$, ќе добиеме:

$$\mathbf{r}^{-1} \cdot \mathbf{E} \cdot U_Z = \mathbf{I} \quad (3.8)$$

Ако сега обете страни ги помножимо од лево со \mathbf{E}^T , со оглед на (3.7) ќе добиеме

$$\mathbf{E}^T \cdot \mathbf{r}^{-1} \cdot \mathbf{E} \cdot U_Z = \mathbf{E}^T \cdot \mathbf{I} = I_Z, \quad (3.9)$$

од каде што следува

$$R_Z = \frac{U_Z}{I_Z} = \frac{1}{\mathbf{E}^T \cdot \mathbf{r}^{-1} \cdot \mathbf{E}}. \quad (3.10)$$

Лесно може да се докаже дека изразот во именителот од дробката на десната страна на (3.10) е всушност еднаков на збирот од сите елементи од матрицата $\mathbf{y} = \mathbf{r}^{-1}$, така што можеме да напишеме

$$R_Z = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n y_{ij}}. \quad (3.11)$$

Напонот на заземјувачот ќе биде

$$U_Z = R_Z \cdot I_Z. \quad (3.12)$$

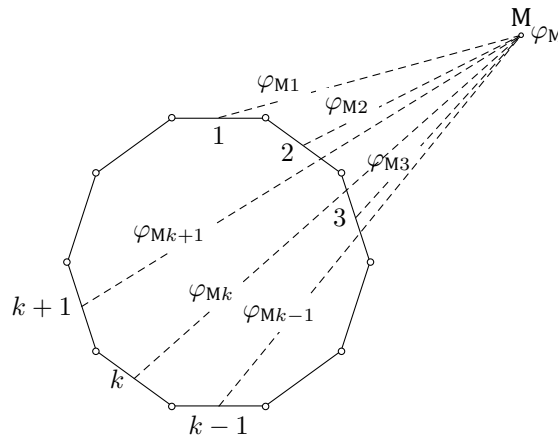
Сега, со помош на (3.4), можеме векторот на струите на одведување од елементите на заземјувачот I да го изразиме преку напонот на заземјувачот U_Z

$$I = r^{-1} \cdot E \cdot U_Z. \quad (3.13)$$

Од (3.13) произлегува дека струјата на одведување I_i од елементот i ќе биде, во општ случај

$$I_i = U_Z \cdot \sum_{j=1}^n y_{ij} = U_Z \cdot (y_{i1} + y_{i2} + \dots + y_{in}), \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad (3.14)$$

каде што со y_{ij} се означени елементите од матрицата $y = r^{-1}$.



Слика 3.2. Пресметка на потенцијал во точка со примена на принципот на суперпозиција

Бидејќи од сите елементи на заземјувачот се одведува струја во земјата, тие во својата околина ќе создадат струјно поле и околу заземјувачот ќе се формира електрично поле. Потенцијалот φ_M во некоја произволна точка од просторот создаден под дејство на струите на одведување ќе се добие со суперпозиција од парцијалните потенцијали што ќе ги создава секој од елементите на заземјувачот

$$\begin{aligned} \varphi_M &= \sum_{i=1}^n r_{iM} \cdot I_i = \\ &= r_{1M} \cdot I_1 + r_{2M} \cdot I_2 + \dots + r_{n-1M} \cdot I_{n-1} + r_{nM} \cdot I_n, \end{aligned} \quad (3.15)$$

или, напишано во матрична нотација

$$\varphi_M = \mathbf{r}_M \cdot \mathbf{I}. \quad (3.16)$$

Во последната матрична равенка со \mathbf{r}_M е означена матрицата редица на меѓусебните отпорности помеѓу елементите од заземјувачот и точката M . Елементот r_{iM} , во општ случај, се дефинира како однос помеѓу потенцијалот φ_M што ќе го создаде елементот i во точката при струја на одведување $I_i = 1$ А, во отсуство на останатите елементи од заземјувачот.

Сите наведени изрази се општи и важат генерално, за сите облици на елементите од заземјувачот. Обликот и димензиите на одделните елементи од заземјувачот, пак, како и нивната заемна положба, ги определуваат вредностите на сопствените и меѓусебните отпорности r_{ij} т.е. елементите од матрицата \mathbf{r} како и елементите на матрицата \mathbf{r}_M за било која точка M во просторот.

3.2.1 Случај кога заземјувачот е составен од праволиниски елементи

Реалните заземјувачи се најчесто изведени од ленти, сонди, јажиња и други елементи кои имаат линеичен облик. Карактеристично за споменатите елементи е фактот што нивната должина е многукратно поголема од нивните напречни димензии, т.е.:

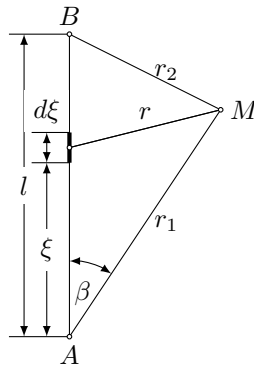
$$l \gg d.$$

Дури и кога заземјувачот има некоја друга, слободна, форма, сепак и тој може успешно да се моделира со мноштво прави спроводници, поврзани во форма на решетка, искршена линија и слично. Тоа овозможува едноставно определување на елементите на матрицата на сопствените и меѓусебни отпорности \mathbf{r} со помош на компјутер.

За таа цел најнапред ќе го изведеме изразот за пресметување на меѓусебната отпорност помеѓу еден праволиниски елемент од заземјувачот, кој што од сега натаму ќе го нарекуваме спроводник и точка која има произволна положба во однос на спроводникот (слика 3.3). И понатаму ќе сметаме дека спроводникот и точката M се наоѓаат во неограничено хомогено тло.

3.2.2 Заемна отпорност помеѓу спроводник и точка

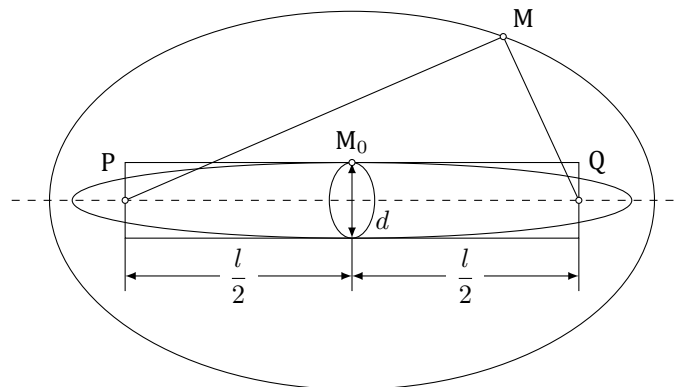
Во наредниот дел ќе го изведеме изразот за пресметка на меѓусебната отпорност α_M помеѓу спроводникот и точката M од сликата 3.3. Нека со l и d ги означиме должината и пречникот, а со I



Слика 3.3. Праволиниски спроводник и точка M во неограничено спроводно тло

струјата на одведување од спроводникот во земјата. Ќе ги воведеме следните претпоставки за кои може да се каже дека се сосема коректни

- должината l е многукратно поголема од пречникот на спроводникот d , така што него можеме без голема грешка, да го третираме како обртен елипсоид чија поголема оска е еднаква на должината l , а помала оска еднаква на пречникот d , со фокусите на краевите од самиот спроводник (слика 3.4) и
- линиската густина на одведување на струјата по должината на спроводникот е константна, еднаква на односот I/l .



Слика 3.4. Еквивалентирање на спроводникот со обртен елипсоид

Под споменатите услови, секој елементарен сегмент од спроводникот со должина $d\xi$, од кој што се одведува елементарна струја $dI = I/l \cdot d\xi$, оддалечен на растојание r , ќе создаде елементарен потенцијал $d\varphi_M$ во

точката M

$$d\varphi_M = \frac{\rho}{4\pi} \cdot \frac{dI}{r} = \frac{\rho \cdot I}{4\pi \cdot l} \cdot \frac{d\xi}{r} \quad (3.17)$$

Вкупниот потенцијал φ_M ќе се добие со интегрирање на диференцијалниот израз (3.17). На тој начин, најнапред ќе го пресметаме потенцијалот φ_M , а потоа и односот φ_M/I , со кој е дефинирана меѓусебната отпорност помеѓу елементот и точката M

$$\alpha_M = \frac{\varphi_M}{I} = \frac{\rho}{4\pi \cdot l} \cdot \int_l \frac{d\xi}{r}. \quad (3.18)$$

Со примена на косинусната теорема, од сликата 3.3 произлегуваат следните релации:

$$r^2 = \xi^2 + r_1^2 - 2 \cdot \xi \cdot r_1 \cdot \cos \beta \quad (3.19)$$

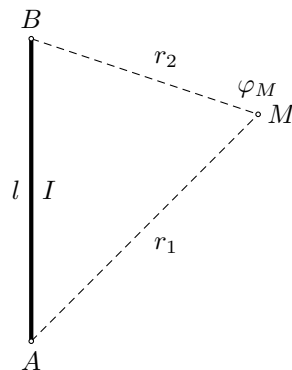
$$r_2^2 = l^2 + r_1^2 - 2 \cdot l \cdot r_1 \cdot \cos \beta \quad (3.20)$$

Ако од (3.19) се одреди $\cos \beta$ и се замени во (3.20) ќе се добие следната релација помеѓу променливата ξ и растојанието r

$$r^2 = \xi^2 + r_1^2 - (r_1^2 - r_2^2 + l^2)/2 \quad (3.21)$$

Ако растојанието r , пресметано според (3.19) се замени во интегралот од (3.18) и тој се реши, ќе се добие следниот израз за меѓусебната отпорност α_M [4]:

$$\alpha_M = \frac{\rho}{4\pi l} \cdot \ln \frac{r_1 + r_2 + l}{r_1 + r_2 - l} \quad (3.22)$$



3.2.3 Сопствена отпорност на спроводник

Сопствената отпорност на праволинискиот спроводник претставува однос помеѓу потенцијалот φ на кој што ќе дојде спроводникот кога од него се одведува во земјата единечна струја $I = 1$ А.

Како што беше нагласено на почетокот, за да можеме да го применуваме изразот (3.18), праволинискиот спроводник, со оглед на односот $l \gg d$, ќе го еквивалентираме со обртен елипсоид околу оската на спроводникот (слика 3.4) при што должината на помалата оска е еднаква на пречникот на спроводникот d , додека краевите на спроводникот P и Q се наоѓаат во фокусите на елипсоидот.

Нека посматраната точка M ја поставиме на самиот спроводник. Тогаш потенцијалот φ_M во точката M ќе биде еднаков на потенцијалот φ на спроводникот, т.е. $\varphi_M = \varphi$, од каде следува

$$\alpha_M = \frac{\varphi_M}{I} = \frac{\varphi}{I} \equiv \alpha_s. \quad (3.23)$$

Значи сопствената отпорност α_s на елементот ќе биде еднаква на отпорноста α_M за случајот кога точката M лежи на самиот елемент. Ако точката ја поставиме на површината од спроводникот точно на неговата средина ($M \equiv M_0$), како на сликата 3.4, тогаш ќе биде:

$$r_1 = r_2 = \sqrt{\left(\frac{l}{2}\right)^2 + \left(\frac{d}{2}\right)^2} = \frac{1}{2} \cdot \sqrt{l^2 + d^2} = \frac{1}{2} \cdot l \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{d}{l}\right)^2}. \quad (3.24)$$

Бидејќи е $l \gg d$, можеме да пишуваме

$$r_1 + r_2 = l \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{d}{l}\right)^2} \approx l \cdot \left(1 + \frac{1}{2} \frac{d^2}{l^2}\right) = l + \frac{d^2}{2l}. \quad (3.25)$$

Во тој случај, врз основа на изразот (3.18) ќе добиеме:

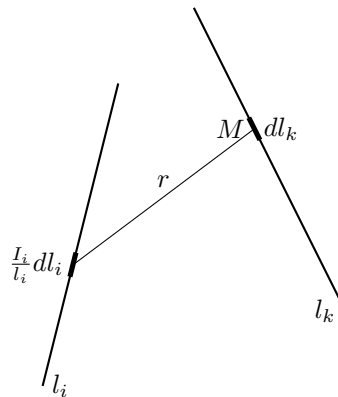
$$\alpha_s = \frac{\rho}{4\pi l} \cdot \ln \frac{r_1 + r_2 + l}{r_1 + r_2 - l} = \frac{\rho}{4\pi l} \cdot \ln \frac{2l + d^2/2l}{d^2/2l} \approx \frac{\rho}{4\pi l} \cdot \ln \frac{4l^2}{d^2} \quad (3.26)$$

или

$$\alpha_s = \frac{\rho}{2\pi l} \cdot \ln \frac{2l}{d}. \quad (3.27)$$

3.2.4 Меѓусебна отпорност помеѓу два праволиниски спроводника

Меѓусебната (заемна) отпорност помеѓу било кои два спроводника ќе ја добиеме со примена на *методот на средни потенцијали* [4]. Според овој метод потенцијалот φ_{ik} на спроводникот k под дејство на полето



Слика 3.5. Два праволинейни спроводника од еден заземјувач

созададено од струјата I_i што се одведува во земјата од спроводникот i , (слика 3.5) е еднаков на средната вредност на потенцијалите од точките по должината на спроводникот k т.е.:

$$\varphi_{ik} = \frac{\rho \cdot I_i}{4\pi l_i} \cdot \int_{l_k} \varphi_{iM} \cdot dl_i. \quad (3.28)$$

Потенцијалот φ_{iM} во произволна точка M на спроводникот k , што фигурира како подинтегрална величина во (3.28) се определува според изразот (3.18). На тој начин се добива:

$$\alpha_{ik} = \frac{\varphi_{ik}}{I_i} = \frac{\rho}{4\pi \cdot l_i \cdot l_k} \cdot \int_{l_i} \int_{l_k} \frac{dl_i \cdot dl_k}{r}. \quad (3.29)$$

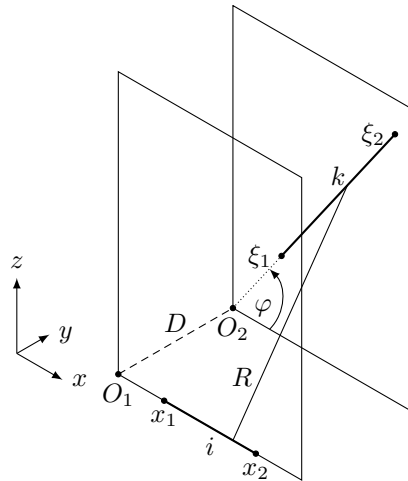
Интегралот од изразот (3.29) е т.н. Нојманов (Neumann) интеграл. Тој се среќава при решавањето и на голем број други проблеми во електромагнетиката.

3.2.5 Решавање на Нојмановиот интеграл

Нојмановиот интеграл обично се решава нумерички, со нумеричка интеграција на интегралот (3.29). Но кога се работи за праволинейни елементи, како во случајот прикажан на сликата 3.5, тогаш е можно неговото решение да се добие во аналитичка форма. Едно аналитичко решение на Нојмановиот интеграл е дадено од Цејтлин (Цейтлин).

За да се примени ова решение потребно е секој од двата спроводника да се постави во специјален, сопствен, координатен систем, како на сликата 3.6. Двата спроводника се поставуваат да лежат во две

паралелни рамнини, оддалечени на растојание D . Ова растојание е еднакво на отсечката $\overline{O_1O_2}$ при што точките O_1 и O_2 се добиваат како пресечни точки на заедничката нормала за двата спроводника и двете рамнини. Спроводникот i лежи на првата рамнина, а растојанијата на неговиот почеток и крај од точката O_1 ќе ги означиме со x_1 и x_2 . Слично, со ξ_1 и ξ_2 ќе ги означиме растојанијата на почетната и крајната точка на спроводникот k од точката O_2 . Поставуваме рамнина што минува низ спроводникот i и отсечката $\overline{O_1O_2}$. Со φ ќе го означиме аголот што се опфаќа помеѓу спроводникот k и неговата проекција врз оваа рамнина. Редоследот на обележување на точките ξ_1 и ξ_2 треба да биде таков што аголот φ ќе има вредност во интервалот $0 \leq \varphi \leq \pi$.



Слика 3.6. Два праволиниски спроводника од еден заземјувач

Општата формула на решението на Нојмановиот интеграл гласи

$$\int_{x_1}^{x_2} \int_{\xi_1}^{\xi_2} \frac{dx \cdot d\xi}{R} = P(x_1, \xi_1) + P(x_2, \xi_2) - P(x_1, \xi_2) - P(x_2, \xi_1), \quad (3.30)$$

каде што се

$$P(x, \xi) = x \cdot \ln |\xi - x \cdot \cos \varphi + R| + \xi \cdot \ln |x - \xi \cdot \cos \varphi + R| + \frac{2D}{\sin \varphi} \cdot \operatorname{arctg} \left(\frac{x + \xi + R}{D} \cdot \operatorname{tg} \frac{\varphi}{2} \right), \quad (3.31)$$

$$R = R(x, \xi) = \sqrt{x^2 + \xi^2 + D^2 - 2 \cdot x \cdot \xi \cdot \cos \varphi}. \quad (3.32)$$

Аголот ψ добиен во (3.31) со изразот

$$\psi = \operatorname{arctg} \left(\frac{x + \xi + R}{D} \cdot \operatorname{tg} \frac{\varphi}{2} \right)$$

се изразува во радијани. Притоа, за позитивни аргументи на функцијата \arctg се зема дека е $0 \leq \psi \leq \pi/2$, додека за негативни аргументи на функцијата \arctg се зема дека е $-\pi/2 \leq \psi \leq 0$.

Специјален случај, кој многу често се среќава во практиката, се добива кога е $\varphi = 0$ и $D \neq 0$. Во тој случај обата спроводника се паралелни и од изразите (3.31) и (3.32) се добива

$$P(x, \xi) = x \cdot \ln |\xi - x + R| + \xi \cdot \ln |x - \xi + R| + (x + \xi + R), \quad (3.33)$$

$$R = R(x, \xi) = \sqrt{(x - \xi)^2 + D^2}. \quad (3.34)$$

Втор специјален, исто така многу често среќаван случај во практиката, претставува случајот кога обата спроводника лежат во иста рамнина (т.е. се копланарни). Сега е $D = 0$, па врз основа на изразите (3.31) и (3.32) се добива:

$$P(x, \xi) = x \cdot \ln |\xi - x \cdot \cos \varphi + R| + \xi \cdot \ln |x - \xi \cdot \cos \varphi + R|, \quad (3.35)$$

$$R = R(x, \xi) = \sqrt{x^2 + \xi^2 - 2 \cdot x \cdot \xi \cdot \cos \varphi}. \quad (3.36)$$

Кога спроводниците лежат на иста права ($\varphi = D = 0$) од (3.35) и (3.36) произлегува релацијата:

$$P(x, \xi) = (x - \xi) \cdot \ln |\xi - x| - x. \quad (3.37)$$

Во сите други, општи, случаи поедноставно е решавањето на Нојмановиот интеграл да се врши нумерички, применувајќи ја релацијата (3.18) како сосема едноставна за примена.

3.2.6 Нумеричко решавање на Нојмановиот интеграл

Равенката (3.29) е прилично едноставна и овозможува наместо со општите Цејтлинови формули, Нојмановиот интеграл да се решава нумерички. Во денешно време, кога ни се достапни современи, брзи и евтини компјутери, тоа е практично единствениот начин што се користи за решавање на сложените заземјувачи.

Кога пресметките ги правиме со компјутер најголем дел од времето потребно за решавање на заземјувачот се троши за пресметка на меѓусебните отпорности. Затоа е многу важно, особено кога станува збор за заземјувач составен од поголем број елементи (нпр. неколку стотини), да се изврши правилен избор на бројот на точките во коишто ќе се врши пресметување на потенцијалот и нивниот распоред.

Јасно е дека кога се елементите блиску еден до друг, потребниот број точки ќе биде поголем отколку во случајот кога се тие оддалечени.

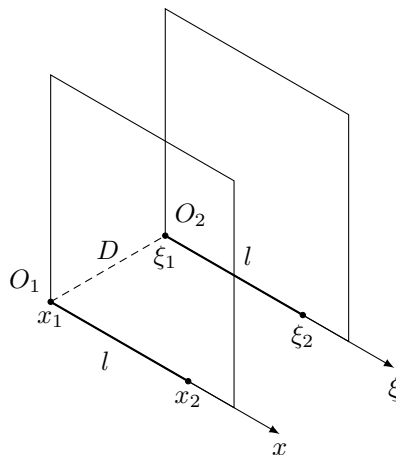
Затоа, во принцип, бројот на точки во кои ќе се врши пресметката на потенцијалот треба да зависи од заемниот распоред на елементите и од односот на нивните димензии и заемното растојание.

Наједноставно е да се работи со фиксен, однапред зададен број точки. Но во тој случај фиксниот број точки ќе биде веројатно преголем кај оддалечените елементи, а премал кај блиските. Тогаш, во првиот случај, непотребно ќе се зголемува времето на пресметка, а во вториот, нема да биде постигната доволно висока точност. Затоа е пожелно да се употребува метод за интеграција кај кој бројот на точки ќе биде динамичен, т.е. ќе се менува во фазата на самата нумеричка интеграција, во согласност со потребите за точност.

Една таква постапка кај која бројот на точки во кои ќе се врши пресметувањето на Нојмановиот интеграл се определува динамично, сообразно со однапред зададената точност, е изложена во [8].

Пример 3.1. Да се изведе изразот за пресметување на меѓусебната отпорност α_m помеѓу два паралелни спроводника со еднакви должини l , поставени на растојание D во неограничена хомогена спроводна средина со специфична отпорност ρ , според сликата П.3.1.1. Така добиениот резултат да се спореди со резултатот добиен со нумеричкото решавање на Нојмановиот интеграл, применувајќи го методот на средни потенцијали, како средна вредност од потенцијалите во $n_t = 5$ рамномерно распределени точки по должината на едниот од нив.

Бројни вредности: $l = 10 \text{ m}$, $D = 2 \text{ m}$, $\rho = 100 \Omega\text{m}$.



Слика П.3.1.1. Два паралелни спроводника со еднакви должини

Решение

1) Пресметка на меѓусебната отпорност со директно решавање на Нојмановиот интеграл

Врз основа на сликата П.3.1.1 ќе имаме

$$x_1 = 0, \quad x_2 = l, \quad \xi_1 = 0, \quad \xi_2 = l.$$

Понатаму, врз основа на изразите (3.33) и (3.34) можеме да пишуваме

$$P(x, \xi) = x \cdot \ln |\xi - x + R| + \xi \cdot \ln |x - \xi + R| + (x + \xi + R),$$

$$R = R(x, \xi) = \sqrt{(x - \xi)^2 + D^2}.$$

Случај 1-1:

$$x = x_1 = 0, \quad \xi = \xi_1 = 0, \quad R = R_{11} = \sqrt{(x_1 - \xi_1)^2 + D^2} = D,$$

$$P(x_1, \xi_1) = x_1 \cdot \ln |\xi_1 - x_1 + R_{11}| + \xi_1 \cdot \ln |x_1 - \xi_1 + R_{11}| + (x_1 + \xi_1 + R_{11}),$$

$$P(x_1, \xi_1) = D.$$

Случај 2-2:

$$x = x_2 = l, \quad \xi = \xi_2 = l, \quad R = R_{22} = \sqrt{(x_2 - \xi_2)^2 + D^2} = D,$$

$$P(x_2, \xi_2) = x_2 \cdot \ln |\xi_2 - x_2 + R_{22}| + \xi_2 \cdot \ln |x_2 - \xi_2 + R_{22}| + (x_2 + \xi_2 + R_{22}),$$

$$P(x_2, \xi_2) = 2l \cdot \ln D + 2l + D.$$

Случај 1-2:

$$x = x_1 = 0, \quad \xi = \xi_2 = l, \quad R = R_{12} = \sqrt{(x_1 - \xi_2)^2 + D^2} = \sqrt{l^2 + D^2},$$

$$P(x_1, \xi_2) = x_1 \cdot \ln |\xi_2 - x_1 + R_{12}| + \xi_2 \cdot \ln |x_1 - \xi_2 + R_{12}| + (x_1 + \xi_2 + R_{12}),$$

$$P(x_1, \xi_2) = l \cdot \ln(\sqrt{l^2 + D^2} - l) + l + \sqrt{l^2 + D^2}.$$

Случај 2-1:

$$x = x_2 = l, \quad \xi = \xi_1 = 0, \quad R = R_{21} = \sqrt{(x_2 - \xi_1)^2 + D^2} = \sqrt{l^2 + D^2},$$

$$P(x_2, \xi_1) = x_2 \cdot \ln |\xi_1 - x_2 + R_{21}| + \xi_1 \cdot \ln |x_2 - \xi_1 + R_{21}| + (x_2 + \xi_1 + R_{21}),$$

$$P(x_2, \xi_1) = l \cdot \ln(\sqrt{l^2 + D^2} - l) + l + \sqrt{l^2 + D^2}.$$

Понатаму, врз основа на (3.30) за Нојмановиот интеграл ќе добиеме

$$\int_{x_1}^{x_2} \int_{\xi_1}^{\xi_2} \frac{dx \cdot d\xi}{r} = P(x_1, \xi_1) + P(x_2, \xi_2) - P(x_1, \xi_2) - P(x_2, \xi_1) =$$

$$= D + (2l \cdot \ln D + 2l + D) - 2l \cdot \ln(\sqrt{l^2 + D^2} - l) -$$

$$- 2\sqrt{l^2 + D^2} - 2l =$$

$$= 2l \cdot \ln \frac{D}{\sqrt{l^2 + D^2} - l} + 2D - 2\sqrt{l^2 + D^2}.$$

И конечно, врз основа на (3.29), за меѓусебната отпорност α_m добиваме

$$\alpha_m = \frac{\rho}{4\pi l^2} \int_{x_1}^{x_2} \int_{\xi_1}^{\xi_2} \frac{dx \cdot d\xi}{r} = \frac{\rho}{2\pi l^2} \left[l \cdot \ln \frac{D}{\sqrt{l^2 + D^2} - l} + D - \sqrt{l^2 + D^2} \right].$$

Со замена на бројните вредности за ρ , D и l се добива

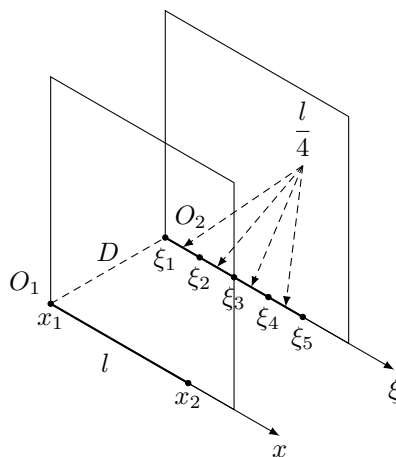
$$\alpha_m = \frac{100}{2\pi \cdot 10^2} \cdot \left[2 - \sqrt{10^2 + 2^2} + 10 \cdot \ln \frac{2}{\sqrt{10^2 + 2^2} - 10} \right] = 2,3756 \Omega.$$

2) *Пресметка на меѓусебната отпорност со нумеричко решавање на Нојмановиот интеграл*

Како што е нагласено во задачата, Нојмановиот интеграл ќе треба да го решиме нумерички, како средна вредност од потенцијалите φ_j , $j = 1, 2, \dots, n_t$ создадени од првиот спроводник што лежи на x оската, со струја на одведување $I = 1$ А, во $n_t = 5$ рамномерно распределени точки по должината на вториот спроводник, кој што лежи на ξ оската на меѓусебни растојанија $\Delta\xi = l/4$. Нека координатите по ξ оската на овие n_t точки бидат опишани со следниот алгоритам

$$\begin{aligned} \xi_j &= \xi_1 + (j - 1) \cdot \Delta\xi = \xi_1 + (j - 1) \cdot \frac{l}{n_t - 1} = \\ &= 0 + (j - 1) \cdot \frac{l}{n_t - 1}, \quad j = 1, 2, \dots, n_t. \end{aligned}$$

како што е тоа прикажано на сликата П.3.1.2.



Слика П.3.1.2. Нумеричко пресметување на Нојмановиот интеграл

На тој начин, врз основа на релацијата (3.18) и сликата П.3.1.2, за потенцијалот φ_1 на првата точка ξ_1 ($j = 1$) добиваме

$$j = 1; \quad \xi_1 = 0; \quad r_1 = D = 2 \text{ m}; \quad r_2 = \sqrt{D^2 + l^2} = 10,198 \text{ m};$$

$$\varphi_1 = \frac{\rho \cdot I}{4\pi l} \cdot \ln \frac{r_1 + r_2 + l}{r_1 + r_2 - l} = 1,840 \text{ V}.$$

Слично се пресметуваат и потенцијалите $\varphi_2 \dots \varphi_5$ и во преостанатите 4 точки. Резултатите од пресметките се прикажани во табелата П.3.1.1.

Табела П.3.1.1. Резултати од пресметките на потенцијалите

j	ξ_j (m)	r_1 (m)	r_2 (m)	$r_1 + r_2$ (m)	φ_j (V)
1	0,00	2,000	10,198	12,198	1,840
2	2,50	3,202	7,762	10,964	2,451
3	5,00	5,385	5,385	10,770	2,622
4	7,50	7,762	3,202	10,964	2,451
5	10,00	10,198	2,000	12,198	1,840

Средната вредност на потенцијалите од петте избрани точки ќе бидат

$$\varphi_{sr.} = \frac{1}{n_t} \sum_{j=1}^{n_t} \varphi_j = \frac{1,840 + 2,451 + 2,622 + 2,451 + 1,840}{5} = 2,241 \text{ V}.$$

што значи вредноста на меѓусебната отпорност α_m , пресметана со нумеричка интеграција на Нојмановиот интеграл во $n_t = 5$ точки изнесува

$$\alpha_m = 2,241 \Omega.$$

Очигледно е дека таа се разликува од точната вредност $\alpha_{m.точно} = 2,3756 \Omega$, добиена по аналитички пат во претходниот дел од задачата, но сепак таа разлика е релативно мала и изнесува само $-5,7\%$.

Со зголемување на бројот на точките на интеграција n_t оваа разлика ќе се намалува. Така, на пример, за $n_t = 10$ точки се добива $\alpha_m = 2,316 \Omega$ (грешка од само $-2,5\%$), за $n_t = 20$ точки се добива $\alpha_m = 2,347 \Omega$ (грешка од само $-1,2\%$), итн. Грешка од околу 1% , по апсолутен износ, се добива веќе за $n_t = 23$ точки, што кај практичните пресметки може да се смета за „висока“ точност.

Може да се покаже, што е и сосема логично, дека со зголемување на растојанието D помеѓу спроводниците, потребниот број точки со кои

се постигнува определена точност ϵ , се намалува. Така, на пример, во претходно анализираниот случај ($l = 10$ m), кога е $D = l/2 = 5$ m, за точност $\epsilon = 1\%$ се потребни само $n_t = 12$ точки, додека кога е $D = l = 10$ m, потребни се само $n_t = 6$ точки, итн. Веќе за $D \geq 2l$ грешка помала од 1% се добива и само со $n_t = 3$ точки.

□ □ □

Пример 3.2. За примерот 3.1 да се направи програма во Matlab со која ќе се пресмета меѓусебната отпорност со нумеричко решавање на Нојмановиот интеграл. При тоа да се анализираат следните два случаја

- а) Пресметка на меѓусебната отпорност со методот на средни потенцијали со однапред зададен број на точки n_t , при што точките се рамномерно распределени по должината на вториот спроводник;
- б) Пресметка на меѓусебната отпорност со решавање на Нојмановиот интеграл со помош на функцијата `integral`.

Решение

Податоците кои се потребни за решавање на проблемот ќе ги запишеме во m-датотека на следниот начин

programi/r_meg_2_lenti/par_lenti.m

```
1 function Z = par_lenti()
2 Z.rho = 100;
3 Z.L = [
4     0  0  -1  10  0  -1
5     0  2  -1  10  2  -1
6     ];
```

од каде што забележуваме дека користиме променлива `rho` за специфичната отпорност на тлото и матрица `L` со две редици со координати на крајните точки на двата спроводника. Во секоја редица се запишани по две тројки за координатите x , y и z за почетната и крајната точка. Според тоа, првиот спроводник има почетна точка $(0, 0, -1)$ и крајна точка $(10, 0, -1)$. Датотеката `par_lenti.m` е напишана во форма на функција која нема влезни параметри, а како излезни параметри ги дава двете променливи `rho` и `L` спакувани во како полиња во структурата `Z`.

- а) *Пресметка на меѓусебната отпорност со рамномерно распределени точки*

Пресметката на меѓусебната отпорност ја правиме со програмата која е дадена во продолжение, при што во неа ја следиме постапката од примерот 3.1.

Програма 3.1. Решавање на Нојмановиот интеграл со прошто сумирање (programi/r_meg_2_lenti/r_meg_2_lenti_sum.m)

```

1 function Rm = r_meg_2_lenti_sum(datoteka,nt)
2 Z = feval(datoteka); rho = Z.rho; L = Z.L;
3 [xp,yp,zp,xk,yk,zk] = ...
4     deal(L(:,1),L(:,2),L(:,3),L(:,4),L(:,5),L(:,6));
5 d1 = sqrt((xk(1)-xp(1))^2 + (yk(1)-yp(1))^2 + (zk(1)-zp(1))^2);
6 xt = linspace(xp(2),xk(2),nt);
7 yt = linspace(yp(2),yk(2),nt);
8 zt = linspace(zp(2),zk(2),nt);
9 r1 = sqrt((xp(1)-xt).^2 + (yp(1)-yt).^2 + (zp(1)-zt).^2);
10 r2 = sqrt((xk(1)-xt).^2 + (yk(1)-yt).^2 + (zk(1)-zt).^2);
11 fi = rho/(4*pi*d1)*log((r1+r2+d1)./(r1+r2-d1));
12 Rm = mean(fi);

```

Функцијата `r_meg_2_lenti_sum` (3.1) ги има следните влезни параметри

`datoteka` Име на *m*-датотеката во која што се внесени податоците за заземјувачот,

`nt` Број на точки со кои е поделен вториот спроводник,

додека како излез од функцијата се добива меѓусебната отпорност `Rm`. Таа се состои од следните главни делови

① Вчитување на податоците од влезната датотека и поделба на матрицата `L` во 6 вектори `xp`, `yp`, `zp`, `xk`, `yk`, `zk` во кои се одделени координатите x , y и z за почетната и крајната точка на двата спроводника. Пресметка на должината `d1` на првиот спроводник како растојание меѓу неговите крајни точки.

② Одредување на векторите `xt`, `yt`, `zt` со координати на точките по должината на вториот спроводник. За илустрација ќе наведеме дека првата од нив го дава следниот резултат

```

>> xt = linspace(xp(2),xk(2),nt)
xt =
    0    2.5000    5.0000    7.5000   10.0000

```

③ Пресметка на растојанијата од крајните точки на првиот спроводник со секоја од точките на вториот спроводник. За одбележување е дека операцијата квадрирање е напишана во векторска форма `{.^2}` наместо `{^2}`, така што таа оперира на секој елемент од векторот одделно. Со тоа добиваме

```

r1 =
    2.0000    3.2016    5.3852    7.7621   10.1980
r2 =
   10.1980    7.7621    5.3852    3.2016    2.0000

```

④ Пресметка на потенцијалите во точките од вториот спроводник, со тоа што тука векторски е напишана операцијата за делење `{./}` наместо `{/}`. Како резултат добиваме

```

fi =
    1.8402    2.4508    2.6216    2.4508    1.8402

```

На крајот меѓусебната отпорност се пресметува како средна вредност од потенцијалите, а бидејќи тие се пресметани при струја од 1 А вредноста на потенцијалот е бројно еднаква на вредноста на бараната меѓусебна отпорност R_m .

Решението го добиваме на следниот начин

```
>> Rm = r_meg_2_lenti_sum('par_lenti',5)
Rm =
    2.2407
```

од каде што забележуваме дека тоа е еднакво на решението од примерот 3.1.

Зависноста на грешката при пресметката на меѓусебната отпорност од бројот на точки можеме да ја добиеме со следната програма. Во неа во for циклус го менуваме бројот на точки од 5 до 30, при што грешката се пресметува со изразот

$$g = \left(\frac{R_m}{R_m^*} - 1 \right) \cdot 100$$

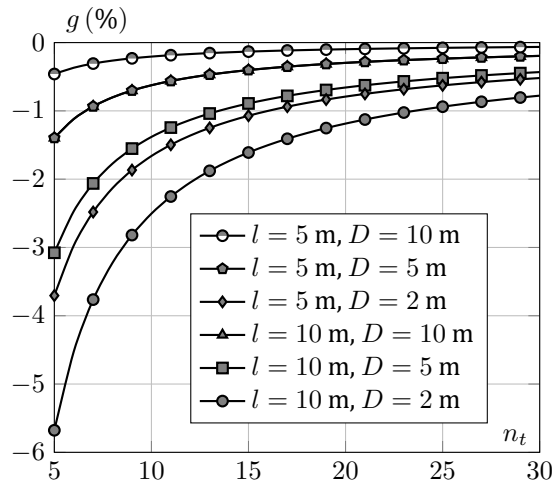
во кој што R_m е пресметаната вредност, а R_m^* е точната вредност, ја сместуваме во векторот g .

programi/r_meg_2_lenti/greska_nt.m

```
1 Rm_tocno = 2.3756;
2 interval = 5:30;
3 g = [];
4 for nt = interval
5     Rm = r_meg_2_lenti_sum('par_lenti',nt);
6     g = [g (Rm/Rm_tocno - 1)*100];
7 end
8 plot(interval,g); grid;
```

Зависноста на грешката при пресметката на меѓусебната отпорност од бројот на точки е прикажан на сликата П.3.2.1 каде што таа е нацртана за различни должини l и растојанија D меѓу двата спроводника. Најдолната крива е за случајот од примерот 3.1, додека другите криви може да се добијат на сличен начин како во програмата `greska_nt.m` со соодветни промени во влезните податоци. Тоа се остава на читателот за вежба.

Од сликата П.3.2.1 се забележува дека потребниот број на точки за постигнување одредена точност (на пример 1%) е помал доколку се работи за пократки спроводници или за спроводници поставени на поголеми растојанија. Исто така се забележува дека точноста на пресметките многу малку се менува кога бројот на точки ќе надмине одредена вредност, во случајот околу 20.



Слика П.3.2.1. Грешка во пресметката на меѓусебниот отпор за различен број на точки

б) Пресметка на меѓусебната отпорност со решавање на Нојмановиот интеграл

Постапката за определување на потребниот број на точки за постигнување одредена точност можеме да ја избегнеме ако користиме готови функции за интегрирање. Една таква функција, која се користи во Matlab, е функцијата `integral`. Пред да покажеме како таа можеме да ја искористиме за решавање на Нојмановиот интеграл ќе решиме еден „едноставен“ интеграл чиј интегранд можеме да го напишеме во аналитичка форма. Ќе го разгледаме следниот пример

$$\int_0^1 (ax^2 + 3x + b) dx,$$

за $a = 2$ и $b = -1$ за кој знаеме дека решението е $2/3 + 3/2 - 1 = 1,1667$.

Програмата со која што можеме да го решиме интегралот е следната

programi/r_meg_2_lenti/int_parabola.m

```

1 a = 2;
2 b = -1;
3 f = @(x) a*x.^2 + 3*x + b;
4 I = integral(f,0,1)

```

каде што гледаме даке интегралот се решава во 2 чекора. Прво дефинираме функција `f` која што е дефинирана како анонимна функција од x (ознака `@(x)` на почетокот), што значи дека таа е функција само

од x додека сите останати променливи се сметаат за константи. Потоа, резултатот го добиваме така што во функцијата `integral` ги наведуваме името на функцијата која што сакаме да ја интегрираме, како и долната и горната граница. Резултатот го добиваме на следниот начин

```
>> int_parabola
I =
    1.1667
```

Бидејќи општиот случај на нумеричко решавање на Нојмановиот интеграл е доста комплициран за да напишеме аналитички израз за подинтегралната функција ќе користиме `m`-датотека во која има функција. Во функцијата ќе употребуваме меѓурекултати со кои го олеснуваме пишувањето на подинтегралната функција и така го правиме целиот процес поразбирлив за читателот.

programi/r_meg_2_lenti/nojman_2_lenti.m

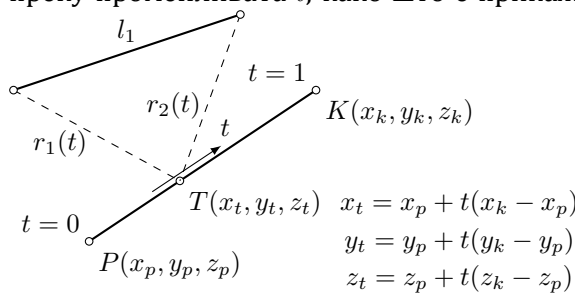
```

1 function I = nojman_2_lenti(t, xp, yp, zp, xk, yk, zk, d1)
2 xt = xp(2) + t*(xk(2)-xp(2));
3 yt = yp(2) + t*(yk(2)-yp(2));
4 zt = zp(2) + t*(zk(2)-zp(2));
5 dx1 = xt-xp(1);
6 dy1 = yt-yp(1);
7 dz1 = zt-zp(1);
8 dx2 = xt-xk(1);
9 dy2 = yt-yk(1);
10 dz2 = zt-zk(1);
11 r1 = sqrt(dx1.^2 + dy1.^2 + dz1.^2);
12 r2 = sqrt(dx2.^2 + dy2.^2 + dz2.^2);
13 I = log((r1+r2+d1)./(r1+r2-d1));

```

Пишувањето на Нојмановиот интеграл во функцијата `nojman_2_lenti` можеме да го поделиме на 3 дела.

- По должината на вториот спроводник, кој има крајни точки P и K , поставуваме точка T на средината. Оддалеченоста на точката T од почетната точка K го изразуваме во релативни единици преку променливата t , како што е прикажано на следната слика.



При тоа $t = 0$ одговара на точката P , додека $t = 1$ одговара на точката K . Координатите на средната точка T се определуваат со изразите прикажани на сликата. Според тоа интегрирањето

во Нојмановиот интеграл ќе го правиме по променливата t во граници од 0 до 1

$$R_m = \frac{\rho}{4\pi l_1} \int_0^1 \ln \frac{r_1(t) + r_2(t) + l_1}{r_1(t) + r_2(t) - l_1} \cdot dt$$

- ② Одредување на изместувања во правците x, y и z од средната точка T до крајните точки на првиот спроводник.
- ③ Определување на растојанија r_1 и r_2 од средната точка T до крајните точки на првиот спроводник и пресметка на подинтегралниот израз на Нојмановиот интеграл. Тука повторно користиме векторски операции $\{.\wedge\}$ и $\{./\}$.

Програма 3.2. Решавање на Нојмановиот интеграл со функција за интегрирање (programi/r_meg_2_lenti/r_meg_2_lenti_int.m)

```

1 function Rm = r_meg_2_lenti_int(datoteka)
2 Z = feval(datoteka); rho = Z.rho; L = Z.L;
3 [xp,yp,zp,xk,yk,zk] = ...
4     deal(L(:,1),L(:,2),L(:,3),L(:,4),L(:,5),L(:,6));
5 d1 = sqrt((xk(1)-xp(1))^2 + (yk(1)-yp(1))^2 + (zk(1)-zp(1))^2);
6 f = @(t) nojman_2_lenti(t, xp, yp, zp, xk, yk, zk, d1);
7 Rm = rho/(4*pi*d1)*integral(f,0,1);
    
```

Решавањето на интегралот е направено со функцијата `r_meg_2_lenti_int` која се состои од 2 дела

- ① Идентично како во функцијата `r_meg_2_lenti_sum` се вчитуваат податоците, се формираат вектори $x_p, y_p, z_p, x_k, y_k, z_k$ и се пресметува должината d_1 .
- ② Дефинирање на анонимна функција од t и решавање на интегралот.

Резултатот го добиваме на следниот начин

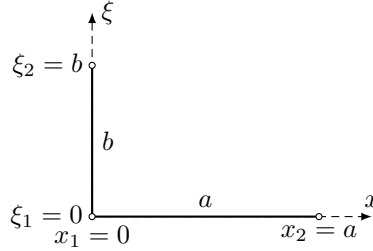
```

>> Rm = r_meg_2_lenti_int('par_lenti')
Rm =
    2.3756
    
```



Пример 3.3. Заземјувач, составен од две заемно нормални страници со должини a и b (слика П.3.3.1) е положен во неограничено хомогено тло со специфична отпорност ρ . Да се пресмета меѓусебната отпорност α_m помеѓу елементите од заземјувачот,

Бројни вредности: $a = 10 \text{ m}, d = 9 \text{ mm}, \rho = 100 \Omega\text{m}, I_Z = 10 \text{ A}.$



Слика П.3.3.1

Решение

Меѓусебната отпорност α_m помеѓу елементите a и b од заземјувачот ќе ја пресметуваме применувајќи ги релациите (3.35) и (3.36) кои што важат за елементи што лежат во иста рамнина ($D = 0$). Во случајов дополнително е познато дека аголот помеѓу нив изнесува $\varphi = 90^\circ$, т.е. $\cos \varphi = 0$. На тој начин ќе добиеме

$$P(x, \xi) = x \cdot \ln |\xi - x \cdot \cos \varphi + R| + \xi \cdot \ln |x - \xi \cdot \cos \varphi + R|$$

$$R = R(x, \xi) = \sqrt{x^2 + \xi^2 - 2 \cdot x \cdot \xi \cdot \cos \varphi} = \sqrt{x^2 + \xi^2}.$$

Врз основа на последните две релации можеме да пишуваме

Случај 1-1 $x_1 = 0; \quad \xi_1 = 0; \quad R = R_{11} = 0; \quad P(x_1, \xi_1) = 0;$
 Случај 1-2 $x_1 = 0; \quad \xi_2 = b; \quad R = R_{12} = b; \quad P(x_1, \xi_2) = b \cdot \ln b;$
 Случај 2-1 $x_2 = a; \quad \xi_1 = 0; \quad R = R_{21} = a; \quad P(x_2, \xi_1) = a \cdot \ln a;$
 Случај 2-2 $x_2 = a; \quad \xi_2 = a; \quad R = R_{22} = c = \sqrt{a^2 + b^2};$

$$P(x_2, \xi_2) = a \cdot \ln(b + c) + b \cdot \ln(a + c);$$

$$\alpha_m = \frac{\rho}{4\pi \cdot a \cdot b} \cdot [P(x_1, \xi_1) + P(x_2, \xi_2) - P(x_1, \xi_2) - P(x_2, \xi_1)] =$$

$$= \frac{\rho}{4\pi \cdot a \cdot b} \cdot [0 + a \cdot \ln(b + c) + b \cdot \ln(a + c) - b \cdot \ln b - a \cdot \ln a] =$$

$$= \frac{\rho}{4\pi \cdot a \cdot b} \cdot \left[a \cdot \ln \frac{b + c}{a} + b \cdot \ln \frac{a + c}{b} \right].$$

Значи, општиот израз за меѓусебната отпорност α_m на елементите од заземјувачот прикажан на сликата П.3.3.1 ќе биде:

$$\alpha_m = \frac{\rho}{4\pi \cdot a \cdot b} \cdot \left[a \cdot \ln \frac{b + \sqrt{a^2 + b^2}}{a} + b \cdot \ln \frac{a + \sqrt{a^2 + b^2}}{b} \right],$$

или

$$\alpha_m = \frac{\rho}{4\pi \cdot b} \left[\ln \frac{b + \sqrt{a^2 + b^2}}{a} + \frac{b}{a} \cdot \ln \frac{a + \sqrt{a^2 + b^2}}{b} \right].$$

Во случајот кога се работи за еднакви страници ($b = a, c = a\sqrt{2}$) ќе добијеме

$$\alpha_m = \frac{\rho}{2\pi \cdot a} \cdot \ln(1 + \sqrt{2}) = 0,88137 \cdot \frac{\rho}{2\pi \cdot a}.$$

За случајот со $a = 10$ m имаме

$$\alpha_m = 0,88137 \cdot \frac{100}{2\pi \cdot 10} = 1,4027 \Omega.$$

Решението можеме да го добијеме и со примена на Matlab. Прво дефинираме влезна датотека за заземјувачот

programi/r_meg_2_lenti/lenti_agol.m

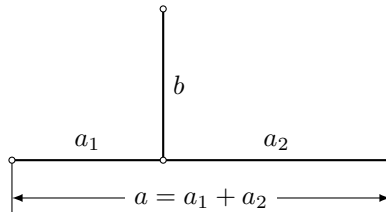
```
1 function Z = lenti_agol()
2 Z.rho = 100;
3 Z.L = [
4     0  0  -1  10  0  -1
5     0  0  -1  0  10  -1
6     ];
```

и потоа резултатот го добиваме на следниот начин

```
>> Rm = r_meg_2_lenti_int('lenti_agol')
Rm =
    1.4027
```

□ □ □

Задача 3.1. Да се изведе изразот за меѓусебната отпорност α_m помеѓу копланарните електроди a и b од заземјувачот прикажан на сликата 3.3.1.1.



Слика 3.3.1.1. Заземјувач со два спроводника вкрстени под прав агол

Одговор

$$\alpha_m = \frac{a_1}{a} \cdot \alpha_{a_1,b} + \frac{a_2}{a} \cdot \alpha_{a_2,b},$$

каде што е:

$$\alpha_{a_1,b} = \frac{\rho}{4\pi \cdot b} \cdot \left[\ln \frac{b + \sqrt{a_1^2 + b^2}}{a_1} + \frac{b}{a_1} \cdot \ln \frac{a_1 + \sqrt{a_1^2 + b^2}}{b} \right],$$

$$\alpha_{a_2,b} = \frac{\rho}{4\pi \cdot b} \cdot \left[\ln \frac{b + \sqrt{a_2^2 + b^2}}{a_2} + \frac{b}{a_2} \cdot \ln \frac{a_2 + \sqrt{a_2^2 + b^2}}{b} \right].$$

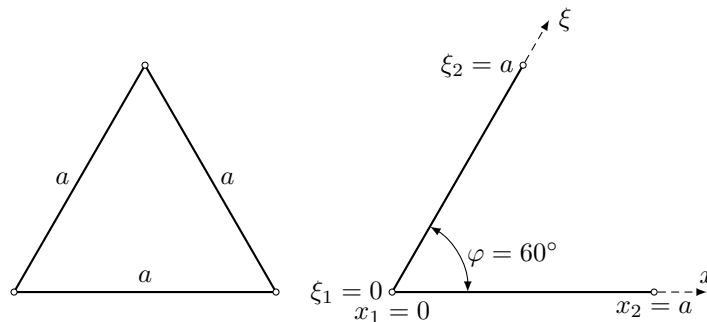


Пример 3.4. Да се пресметаат сопствените и меѓусебните отпорности на елементите од еден рамностран триаголник со страница a , поставен во неограничена хомогена средина со специфична отпорност ρ . Колкава е отпорноста на распростирање на заземјувачот R_Z . Колкав ќе биде неговиот потенцијал U_Z а колкав потенцијалот φ_T во тежиштето T на заземјувачот ако е позната струјата на одведување од заземјувачот во земјата I_Z . Колкави ќе бидат струите на одведување I_i ($i = 1, 2, 3$) од одделните електроди на триаголникот. сите спроводници имаат ист напречен пресек и ист пречник d .

Бројни вредности: $a = 10 \text{ m}$; $d = 9 \text{ mm}$; $\rho = 100 \Omega\text{m}$; $I_Z = 10 \text{ A}$.

Решение

На сликата П.3.4.1 – лево е прикажан разгледуваниот заземјувач во форма на рамностран триаголник. Од причини на симетрија доволно ќе биде да ги пресметаме сопствената отпорност r_s на било која од страниците на триаголникот и меѓусебната отпорност r_m помеѓу било кој пар страници, нпр. помеѓу основата и левата страница (слика П.3.4.1 – десно).



Слика П.3.4.1

Сопствената отпорност на спроводник со должина a и пречник d , според (3.27) ќе биде

$$r_s = \alpha_s = \frac{\rho}{2\pi a} \cdot \ln \frac{2a}{d} = \frac{100}{2\pi \cdot 10} \cdot \ln \frac{2 \cdot 10}{0,009} = 12,265 \Omega.$$

Меѓусебната отпорност α_m помеѓу двете страници од триаголникот ќе ја пресметаме со примена на реалциите (3.35) и (3.36) коишто произлегуваат од општото решение на Нојмановиот интеграл за случајот кога се спроводниците компланарни ($D = 0$).

$$P(x, \xi) = x \cdot \ln |\xi - x \cdot \cos \varphi + R| + \xi \cdot \ln |x - \xi \cdot \cos \varphi + R|$$

$$R = R(x, \xi) = \sqrt{x^2 + \xi^2 - 2 \cdot x \cdot \xi \cdot \cos \varphi}; \quad \cos \varphi = \cos(60^\circ) = 1/2.$$

На тој начин ќе добиеме

$$(1) \quad x_1 = 0; \xi_1 = 0; R = 0; P(x_1, \xi_1) = 0;$$

$$(2) \quad x_1 = 0; \xi_2 = a; R = a; P(x_1, \xi_2) = a \cdot \ln(a/2);$$

$$(3) \quad x_2 = a; \xi_1 = 0; R = a; P(x_2, \xi_1) = a \cdot \ln(a/2);$$

$$(4) \quad x_2 = a; \xi_2 = a; R = a; P(x_2, \xi_2) = 2a \cdot \ln(3a/2);$$

$$\begin{aligned} \alpha_m &= \frac{\rho}{4\pi \cdot a^2} \cdot [P(x_1, \xi_1) + P(x_2, \xi_2) - P(x_1, \xi_2) - P(x_2, \xi_1)] = \\ &= \frac{\rho}{4\pi \cdot a^2} \cdot 2a \cdot \ln 3 = \frac{\rho}{2\pi \cdot a} \cdot \ln 3. \end{aligned}$$

$$r_m = \alpha_m = \frac{100}{2\pi \cdot 10} \cdot \ln 3 = 1,7485 \Omega.$$

За да ја пресметаме меѓусебната отпорност со примена на Matlab ја дефинираме следната влезна датотека за заземјувачот

programi/r_meg_2_lenti/triagnolnik.m

```

1 function Z = triagnolnik()
2 Z.rho = 100;
3 Z.L = [
4     0  0  -1  10         0  -1
5     0  0  -1   5*sqrt(3) -1
6     ];

```

и потоа резултатот го добиваме на следниот начин

```

>> Rm = r_meg_2_lenti_int('triagnolnik')
Rm =
1.7485

```

Матрицата r на сопствените и меѓусебните отпорности сега ќе биде

$$r = \begin{bmatrix} r_s & r_m & r_m \\ r_m & r_s & r_m \\ r_m & r_m & r_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 12,265 & 1,7485 & 1,7485 \\ 1,7485 & 12,265 & 1,7485 \\ 1,7485 & 1,7485 & 12,265 \end{bmatrix} \Omega.$$

Со инверзија на матрицата r ќе ја добиеме матрицата y

$$y = \begin{bmatrix} 0,08454 & -0,01055 & -0,01055 \\ -0,01055 & 0,08454 & -0,01055 \\ -0,01055 & -0,01055 & 0,08454 \end{bmatrix} S.$$

Отпорноста на распространяње на заземјувачот R_Z , според (3.10) ќе биде:

$$R_Z = \frac{1}{\sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 y_{ij}} = \frac{1}{3 \cdot 0,08454 - 6 \cdot 0,01055} = 5,2543 \Omega.$$

Напонот на заземјувачот, според (3.12), ќе биде

$$U_Z = R_Z \cdot I_Z = 5,2543 \cdot 10 = 52,543 \text{ V.}$$

Сега, со помош на (3.13) односно (3.14), можеме да го пресметаме векторот на струите на одведување од елементите на заземјувачот I . Неговите елементи ќе бидат

$$I_i = U_Z \cdot \sum_{j=1}^n y_{ij}, \quad i = 1, 2, \dots, n.$$

Значи струјата I_i , во општ случај, ќе ја добиеме кога сумата на елементите на матрицата $y = r^{-1}$ што припаѓаат на i -тата редица ќе ја помножиме со напонот на заземјувачот U_Z . На тој начин за струјата I_1 што се одведува во земјата од првиот елемент ќе добиеме

$$I_1 = U_Z \cdot (y_{11} + y_{12} + y_{13}) = 52,543 \cdot (0,08454 - 0,01055 - 0,01055) = 3,3333 \text{ A.}$$

Слично ги добиваме и останатите струи I_2 и I_3

$$I_2 = I_3 = 3,3333 \text{ A.}$$

Добиениот резултат е сосема логичен бидејќи сите елементи од триаголникот имаат исти должини, исти карактеристики и ист замен распоред.

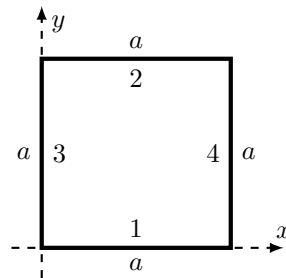
□ □ □

Пример 3.5. Да се формира матрицата r на заземјувач во форма на квадрат со страница $a = 10 \text{ m}$, поставен во неограничена хомогена спроводна средина со специфична отпорност $\rho = 100 \Omega\text{m}$. Заземјувачот е изведен од бакарно јаже со пресек $\text{Cu}50 \text{ mm}^2$ и пречник $d = 9 \text{ mm}$. Колкава ќе биде отпорноста на распростирање на заземјувачот во наведените услови.

Решение

Најнапред ќе извршиме нумерација на елементите од заземјувачот како на сликата П.3.5.1. Сопствените отпорности на елементите од заземјувачот се исти $r_{ii} = \alpha_s$ бидејќи сите страници од квадратот имаат еднакви должини $a = 10 \text{ m}$. Нив ќе ги пресметаме со помош на релацијата (3.27):

$$\alpha_s = \frac{\rho}{2\pi a} \cdot \ln \frac{2a}{d} = \frac{100}{2\pi \cdot 10} \cdot \ln \frac{2 \cdot 10}{9 \cdot 10^{-3}} = 12,2649 \Omega.$$



Слика П.3.5.1

Меѓусебните отпорности помеѓу спроводниците од заземјувачот можеме да ги пресметаме нумерички, како во претходните примери 3.1 и 3.2 или, пак, со помош на Matlab. Тука ќе го избереме вториот начин и на почетокот ја дефинираме следната влезна датотека за заземјувачот

programi/r_meg_2_lenti/kvadrat.m

```

1 function Z = kvadrat()
2 Z.rho = 100;
3 Z.L = [
4     0  0  -1  10  0  -1
5     0 10  -1  10  10  -1
6     0  0  -1  0  10  -1
7     10  0  -1  10  10  -1
8     ];

```

во која што, за разлика од претходно, матрицата Z.L има 4 редици колку што има спроводници во заземјувачот. Пресметката на меѓусебните отпорни помеѓу сите спроводници на заземјувач можеме да го направиме следната програма.

Програма 3.3. Пресметување на меѓусебна отпорност за повеќе спроводници одеднаш (programi/r_meg_2_lenti/r_meg_n_lenti.m)

```

1 function R = r_meg_n_lenti(datoteka)
2 Z = feval(datoteka); rho = Z.rho; L = Z.L;
3 [xp,yp,zp,xk,yk,zk] = ...
4     deal(L(:,1),L(:,2),L(:,3),L(:,4),L(:,5),L(:,6));
5 n = length(xp);
6 R = zeros(n);
7 for i = 1:n
8     d1 = sqrt((xk(i)-xp(i))^2 + (yk(i)-yp(i))^2 + (zk(i)-zp(i))^2);
9     for j = i+1:n
10        k = [i j];
11        [xp1,yp1,zp1,xk1,yk1,zk1] = ...
12            deal(xp(k),yp(k),zp(k),xk(k),yk(k),zk(k));
13        f = @(t) nojman_2_lenti(t,xp1,yp1,zp1,xk1,yk1,zk1,d1);
14        R(i,j) = rho/(4*pi*d1)*integral(f,0,1);
15        R(j,i) = R(i,j);
16    end
17 end

```

Функцијата `r_meg_n_lenti` е многу слична со функцијата `r_meg_2_lenti_int` која ја користевме за пресметка на меѓусебна отпорност меѓу 2 спроводника. Во неа ќе ги издвоиме следните 4 делови

- ① Идентично како во функцијата `r_meg_2_lenti_int` се вчитуваат податоците и се формираат векторите $x_r, y_r, z_r, x_k, y_k, z_k$.
- ② Определување на бројот на спроводници n и формирање матрица r со димензии $n \times n$. Потоа во `for` циклус во кој променливата i оди од 1 до n се пресметува должината на спроводникот i .
- ③ Во `for` циклус, во кој променливата j оди од $i + 1$ до n , се формира векторот $k = [i \ j]$. Тој служи за формирање на векторите $x_{r1}, y_{r1}, z_{r1}, x_{k1}, y_{k1}, z_{k1}$ кои се добиваат така што од векторите $x_r, y_r, z_r, x_k, y_k, z_k$ ги земаме елементите со редни броеви i и j . Со тоа проблемот, локално, го сведуваме на проблем за определување на меѓусебна отпорност меѓу спроводниците i и j .
- ④ Дефинирање на анонимна функција од t и решавање на интегралот со што ја добиваме меѓусебната отпорност r_{ij} . На крајот задаваме $r_{ji} = r_{ij}$.

Резултатот го добиваме на следниот начин

```
>> R = r_meg_n_lenti_int('kvadrat')
R =
    0    0.7435    1.4027    1.4027
    0.7435    0    1.4027    1.4027
    1.4027    1.4027    0    0.7435
    1.4027    1.4027    0.7435    0
```

во кој како што гледаме недостигаат дијагоналните елементи кои се еднакви на сопствените отпорности на спроводниците. Нив можеме да ги додадеме со следната команда

```
>> R = R + 12.2649*eye(4)
```

со што ја добиваме бараната матрица на сопствените и меѓусебните отпорности на разгледуваниот заземјувач

$$r = \begin{bmatrix} 12,2649 & 0,7435 & 1,4027 & 1,4027 \\ 0,7435 & 12,2649 & 1,4027 & 1,4027 \\ 1,4027 & 1,4027 & 12,2649 & 0,7435 \\ 1,4027 & 1,4027 & 0,7435 & 12,2649 \end{bmatrix} \Omega$$

Отпорноста на распростирање на заземјувачот R_Z ќе ја добиеме кога ќе ги собереме сите елементи од инверзната матрица $y = r^{-1}$ и од добиената сума ќе побараме реципрочна вредност. Со инверзија на

матрицата r ќе добиеме

$$y = \begin{bmatrix} 0,08371 & -0,00309 & -0,00869 & -0,00869 \\ -0,00309 & 0,08371 & -0,00869 & -0,00869 \\ -0,00869 & -0,00869 & 0,08371 & -0,00309 \\ -0,00869 & -0,00869 & -0,00309 & 0,08371 \end{bmatrix} S$$

На крајот, отпорноста распростирање на заземјувачот изнесува

$$R_z = \frac{1}{\sum_{i=1}^4 \sum_{j=1}^4 y_{ij}} = \frac{1}{0,2529} = 3,954 \Omega.$$

□ □ □

3.2.7 Заземјувач поставен во ограничена средина. Метод „лик во огледало“

Реалните заземјувачи не се наоѓаат во неограничена хомогена средина туку можат да бидат само поставени во ограничена средина, закопани во земјата на определена длабочина h под нејзината површина. Длабочината на закопување се избира така што ќе бидат избегнати во доволна мера сушењето на земјата во летните месеци или можноста за нејзино замрзнување, во зимските месеци, како и сезонските варијации на нејзината специфична отпорност. Со тоа се намалува влијанието на варијациите на отпорноста ρ на тлото врз карактеристиките на заземјувачот и се врши стабилизација на неговите параметри.

Затоа, во пресметките е неопходно да се земе предвид ограниченоста на средината во која што се наоѓа заземјувачот т.е. на некој начин да се опфати влијанието на дисконтинуитетот што го воведува површината на земјата и воздухот над неа.

Влијанието на површината на земјата се опфаќа со воведување на уште еден таков заземјувач поставен симетрично во однос на рамнината на дисконтинуитет по принципот „лик во огледало“.

Како што е познато полето во било која точка во земјата или на нејзината површина, создадено од реалниот заземјувач поставен во ограничената земја ќе биде идентично со полето што би се добило кога просторот над површината од земјата целосно се исполни со земја со иста специфична отпорност и истовремено, симетрично во однос на неа, над реалниот заземјувач, се постави уште еден ист таков заземјувач (наречен негов лик) со иста струја на одведување како и реалниот заземјувач.

На тој начин се постигнуваат граничните услови што се имаат кај реалните заземјувачи – нормалната компонента на векторот на густината на струјата J_n и на полето E_n да бидат еднакви на нула во било која точка од површината на земјата. Но претходно изведените изрази за сопствените и меѓусебните отпорности ќе важат и понатаму само што сега, место еден заземјувач со n , ќе имаме два заземјувача со вкупно $2n$ елементи.

Сепак бидејќи струите I_i и I'_i од елементот i и неговиот лик се исти ($I_i = I'_i$), проблемот на решавањето на заземјувачот повторно се сведува на решавање линеарен систем од n равенки од типот (3.3) односно (3.4). Но во овој случај елементите r_{ij} на матрицата на отпорности во системот ќе се променат и ќе бидат

$$r_{ij} = \alpha_{ij} + \alpha'_{ij}, \quad (3.38)$$

бидејќи потенцијалот на било која точка во земјата или било кој елемент од заземјувачот, по принципот на суперпозиција, ќе се добива со собирање на парцијалните потенцијали што ги создава елементот i и неговиот лик i' .

На тој начин и потенцијалот φ_{iM} што го создава елементот i , заедно со неговиот лик i' , во точката M ќе биде

$$\varphi_{iM} = r_{iM} \cdot I_i = (\alpha_{iM} + \alpha'_{iM}) \cdot I_i. \quad (3.39)$$

Ако точката M се наоѓа на површината од земјата тогаш ќе биде $\alpha_{iM} = \alpha'_{iM}$ така што изразот ќе се упрости и ќе го има следниот облик

$$\varphi_{iM} = r_{iM} \cdot I_i = 2 \cdot \alpha_{iM} \cdot I_i. \quad (3.40)$$

Пример 3.6. Заземјувачот во форма на квадрат, разгледуван во примерот 3.4, да се реши за случајот кога е тој поставен во ограничена спроводна хомогена средина со специфична отпорност $\rho = 100 \Omega\text{m}$, закопан на длабочина $h = 1 \text{ m}$. Колкав е потенцијалот φ во тежиштето T од квадратот, а колкав во точката на површината од земјата T_0 над самото тежиште.

Бројни вредности: $a = 10 \text{ m}$, $d = 9 \text{ mm}$, $h = 1 \text{ m}$, $I_Z = 10 \text{ A}$, $\rho = 100 \Omega\text{m}$.

Решение

Под поимот „решавање на заземјувач“ ќе подразбираме, меѓу другото, пресметување на неговата отпорност на распростирање R_Z и пресметување на струите на одведување I_i , $i = 1, 2, \dots, n$ во земјата од неговите одделни елементи.

Во овој случај (појава на лик на заземјувачот поради земјата која претставува рамнина на дисконтинуитет) елементите од матрицата на

отпорностите на заземјувачот r ќе се пресметуваат во согласност со релацијата (3.38). Значи, во општ случај, елементот r_{ii} ќе се добие како збир од сопствената отпорност α_{ii} на елементот i и меѓусебната отпорност $\alpha_{ii'}$ помеѓу елементот i и неговиот лик i'

$$r_{ii} = \alpha_{ii} + \alpha_{ii'}, \quad (\text{П.3.6.1})$$

додека елементот r_{ij} ќе биде збир од меѓусебната отпорност α_{ij} помеѓу елементите i и j и меѓусебната отпорност $\alpha_{ij'}$ помеѓу елементот i и ликот j' од елементот j , т.е.

$$r_{ij} = \alpha_{ij} + \alpha_{ij'}, \quad (\text{П.3.6.2})$$

Со оглед на потребниот обем на пресметките очигледно е дека сега веќе проблемот тешко ќе се реши без помош од компјутер. Затоа, задачата ќе ја решиме со помош на програмата Matlab.

Влезните податоци, како и претходно, ги задаваме во посебна м-датотека во која сега има уште една колона во матрицата $Z.L$. Во колоната 7 од оваа матрица даден е пречникот на секој спроводник, при што тој е изразен во mm. Тој податок е потребен за да можеме да ја пресметаме сопствената отпорност на спроводникот α_{ii} , додека останатите големини $\alpha_{ii'}$, α_{ij} и $\alpha_{ij'}$ зависат од растојанијата меѓу одделните спроводници, а за тоа имаме податоци во колоните од 1 до 6. Струјата која што се инјектира во заземјувачот е дадена во променливата $Z.Iz$.

programi/zaz/kvadrat_d.m

```

1 function Z = kvadrat_d()
2 Z.Iz = 10;
3 Z.rho = 100;
4 Z.L = [
5     0  0  -1  10  0  -1  9
6     0 10  -1  10  10  -1  9
7     0  0  -1  0  10  -1  9
8    10  0  -1  10  10  -1  9
9     1];

```

За определување на матрицата r ќе ја користиме функцијата `zaz` која претставува надградба на функцијата `r_meg_n_lenti` со тоа што во неа е додадена пресметка на α_{ii} и е уважено постоењето на ликовите на спроводниците над површината на земјата. Во неа ќе ги издвоиме следните делови

- ① Вчитување на податоците и дуплирање на матрицата $Z.L$ така што бројот на спроводници во заземјувачот станува $2n$. При тоа на елементите од $n + 1$ до $2n$, кои всушност се ликовите, го менуваме знакот на координатата z . Потоа ги формираме векторите

$x_r, y_r, z_r, x_k, y_k, z_k, d_r$. Векторот d_r ги содржи дијаметрите на спроводниците изразени во m .

- ② Формирање на матрица r со димензии $n \times 2n$, при што во колоните од 1 до n ќе ги имаме сопствените и меѓусебните отпорности на „вистинските“ елементи на заземјувачот, а во колоните од $n + 1$ до $2n$ ќе ги имаме сопствените и меѓусебните отпорности на помеѓу „вистинските“ елементи и нивните „ликови“. Потоа во `for` циклус како и во функцијата `r_meg_n_lenti` ги пресметуваме елементите на матрицата r . Освен тоа во редицата 12 ги пресметуваме сопствените отпорности на спроводниците поставени во неограничена средина.
- ③ Согласно релациите (П.3.6.1) и (П.3.6.2) и начинот на којшто ја формиравме матрицата r произлегува дека треба да ги собереме првите n колони со последните n колони и на тој збир во дијагоналата да ги додадеме елементите од векторот rs . Тоа е направено во оваа редица од функцијата.
- ④ На крајот од функцијата се пресметуваат отпорноста на распростирање на заземјувачот, неговиот напон и струите кои се одведуваат од одделните спроводници на заземјувачот.

Програма 3.4. Пресметување на матрицата r со методот „лик во огледало“ (programi/zaz/zaz.m)

```

1 function [r,Rz,Uz,I,L] = zaz(datoteka)
2 if isstruct(datoteka)
3     Z = datoteka;
4 else
5     Z = feval(datoteka);
6 end
7 rho = Z.rho; L = Z.L; n = size(L,1);
8 L = [L; L];
9 L(n+1:end,[3 6]) = -L(n+1:end,[3 6]);
10 [xp,yp,zp,xk,yk,zk,dp] = ...
11     deal(L(:,1),L(:,2),L(:,3),L(:,4),L(:,5),L(:,6),L(:,7))/1000);
12 r = zeros(n,2*n);
13 rs = zeros(n,1);
14 for i = 1:n
15     d1 = sqrt((xk(i)-xp(i))^2 + (yk(i)-yp(i))^2 + (zk(i)-zp(i))^2);
16     rs(i) = rho/(2*pi*d1)*log(2*d1/dp(i));
17     for j = i+1:2*n
18         k = [i j];
19         [xp1,yp1,zp1,xk1,yk1,zk1] = ...
20             deal(xp(k),yp(k),zp(k),xk(k),yk(k),zk(k));
21         f = @(t) nojman(t,xp1,yp1,zp1,xk1,yk1,zk1,d1);
22         r(i,j) = rho/(4*pi*d1)*integral(f,0,1);
23         if j<= n
24             r(j,i) = r(i,j);
25         end
26     end
27 end
28 r = r(:,1:n) + r(:,n+1:end) + diag(rs);
29 Y = r^-1;

```

```

30 Rz = 1/sum(Y(:));
31 Uz = Rz*Z.Iz;
32 I = Uz*sum(Y,2);

```

Матрицата r можеме да ја добиеме со помош на следната команда

```

>> r = zaz('kvadrat_d')
r =
14.6405    1.4742    2.5778    2.5778
 1.4742   14.6405    2.5778    2.5778
 2.5778    2.5778   14.6405    1.4742
 2.5778    2.5778    1.4742   14.6405

```

а со нејзина инверзија се добива матрицата y

$$y = \begin{bmatrix} 0,07254 & -0,00341 & -0,01106 & -0,01106 \\ -0,00341 & 0,07254 & -0,01106 & -0,01106 \\ -0,01106 & -0,01106 & 0,07254 & -0,00341 \\ -0,01106 & -0,01106 & -0,00341 & 0,07254 \end{bmatrix} S.$$

Сумата на сите елементи од матрицата y ќе биде

$$\sum y_{ij} = 4 \cdot 0,07254 - 4 \cdot 0,00341 - 8 \cdot 0,01106 = 0,1881 S.$$

Според тоа отпорноста на распростирање R_Z на заземјувачот, уважувајќи го и присуството на неговиот лик со кое што се опфаќа влијанието на дисконтиунитетот на средината, ќе биде

$$R_Z = \frac{1}{0,1881} = 5,316 \Omega.$$

Напонот на заземјувачот ќе биде

$$U_Z = R_Z \cdot I_Z = 5,316 \cdot 10 = 53,16 V.$$

Струјата I_1 што се одведува од првиот елемент на заземјувачот ќе биде

$$I_1 = U_Z \cdot \sum_{j=1}^4 y_{1j} = 53,16 \cdot (0,07254 - 0,00341 - 2 \cdot 0,01106) = 2,5 A.$$

Слично се добиваат и останатите струи

$$I_2 = I_3 = I_4 = I_1 = 2,5 A.$$

Сега можеме да ги пресметаме потенцијалите φ_T и φ_{T_0} во точките $T(5, 5 - 1)$ и $T_0(5, 5, 0)$.

Потенцијалот од првата страна на квадратот во точката T можеме да го добиеме на следниот начин

$$\begin{aligned}r_1 &= \sqrt{(0-5)^2 + (0-5)^2 + (-1-(-1))^2} = 7,0711 \text{ m} \\r_2 &= \sqrt{(10-5)^2 + (0-5)^2 + (-1-(-1))^2} = 7,0711 \text{ m} \\ \varphi_1 &= \frac{\rho \cdot I_1}{4\pi l_1} \ln \frac{r_1 + r_2 + l_1}{r_1 + r_2 - l_1} = \frac{100 \cdot 2,5}{4\pi \cdot 10} \ln \frac{7,0711 + 7,0711 + 10}{7,0711 + 7,0711 - 10} = 3,5068 \text{ V},\end{aligned}$$

додека потенцијалот од ликот на првата страна на квадратот во точката T изнесува

$$\begin{aligned}r_1 &= \sqrt{(0-5)^2 + (0-5)^2 + (1-(-1))^2} = 7,3485 \text{ m} \\r_2 &= \sqrt{(10-5)^2 + (0-5)^2 + (1-(-1))^2} = 7,3485 \text{ m} \\ \varphi'_1 &= \frac{\rho \cdot I_1}{4\pi l_1} \ln \frac{r_1 + r_2 + l_1}{r_1 + r_2 - l_1} = \frac{100 \cdot 2,5}{4\pi \cdot 10} \ln \frac{7,3485 + 7,3485 + 10}{7,3485 + 7,3485 - 10} = 3,3020 \text{ V}\end{aligned}$$

Бидејќи квадратот има 4 страни и нивни 4 ликови симетрично поставени во однос на точката T нејзиниот потенцијал ќе биде

$$\varphi_T = 4 \cdot (\varphi_1 + \varphi'_1) = 4 \cdot (3,5068 + 3,3020) = 27,2352 \text{ V}.$$

Потенцијалот од првата страна на квадратот во точката T_0 можеме да го добиеме на следниот начин

$$\begin{aligned}r_1 &= \sqrt{(0-5)^2 + (0-5)^2 + (-1-0)^2} = 7,1414 \text{ m} \\r_2 &= \sqrt{(10-5)^2 + (0-5)^2 + (-1-0)^2} = 7,1414 \text{ m} \\ \varphi_0 &= \frac{\rho \cdot I_1}{4\pi l_1} \ln \frac{r_1 + r_2 + l_1}{r_1 + r_2 - l_1} = \frac{100 \cdot 2,5}{4\pi \cdot 10} \ln \frac{7,1414 + 7,1414 + 10}{7,1414 + 7,1414 - 10} = 3,4520 \text{ V},\end{aligned}$$

Бидејќи сите 4 страни и сите 4 ликови се поставени симетрично во однос на точката T_0 нејзиниот потенцијал ќе биде

$$\varphi_{T_0} = 8 \cdot \varphi_0 = 8 \cdot 3,4520 = 27,6160 \text{ V}.$$

Примерот можеме целосно да го решиме со следната програма

programi/zaz/resi_kvadrat.m

```
1 [R,Rz,Uz,I,L] = zaz('kvadrat_d');
2 rho = 100;
3 T = [
4     5 5 -1
5     5 5  0
6     ];
7 I = [I; I];
8 for i=1:2
9     fi(i) = pot_tocka(T(i,:),I,L,rho);
10 end
11 fprintf('fi(%i) = %.4f V\n',[1:2]' fi');
```


во која на почетокот ги пресметуваме параметрите на заземјувачот r , R_z , U_z и I , а потоа со примена на функцијата `pot_tocka` ги пресметуваме потенцијалите во точките T и T_0 чии координати се дадени во матрицата T . На таков начин добиваме

```
>> resi_kvadrat
fi(1) = 27.2355 V
fi(2) = 27.6158 V
```

Функцијата `pot_tocka` пресметува потенцијал во точка чии координати се дадени во векторот T . Таа како влезни параметри ги користи променливите I и L кои се добиваат како излез од функцијата `zaz`. Во неа потенцијалот се пресметува како сума од потенцијалите од одделните спроводници, вклучувајќи ги и нивните ликови, при што потенцијалот од еден спроводник се пресметува со (3.22). Координатите на крајните точки на спроводникот се дадени во векторите P и Q , а растојанијата меѓу две точки во простор се пресметуваат со командата `norm`. Така на пример `norm(P-Q)` пресметува растојание меѓу точките P и Q , т.е. должината на спроводникот, додека растојанијата од крајните точки на спроводникот и разгледуваната точка се пресметуваат со изразите `norm(P-T)` и `norm(Q-T)`.

**Програма 3.5. Пресметување на потенцијал во точка
(programi/zaz/pot_tocka.m)**

```
1 function fi = pot_tocka(T,I,L,rho)
2 fi = 0;
3 n = size(L,1);
4 for i = 1:n
5     [P,Q] = deal(L(i,1:3),L(i,4:6));
6     d = norm(P-Q);
7     r1 = norm(P-T);
8     r2 = norm(Q-T);
9     fi = fi + rho*I(i)/(4*pi*d)*log((r1+r2+d)/(r1+r2-d));
10 end
```



Пример 3.7. За заземјувачот од примерот 3.6 да се нацрта потенцијалната инка за потенцијалите на површината на земјата во областа $x \in [-5, 15]$ m и $y \in [-5, 15]$ m. Да се нацртаат и екипотенцијалните линии во истата област. Потенцијалите да се изразат во проценти од напонот на заземјувачот.

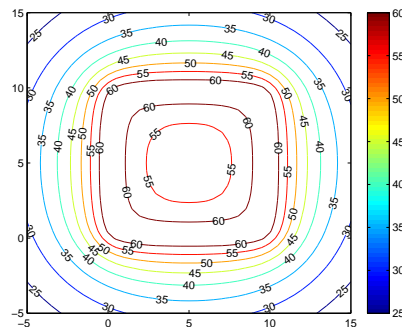
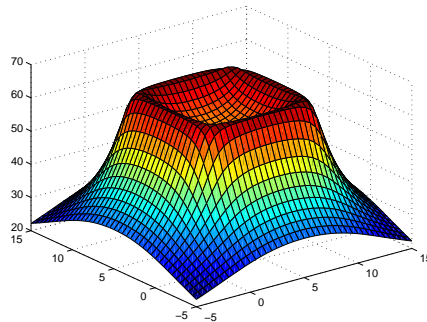
Решение

Решението ќе го добиеме со програмата `kvadrat_inka` во која на почетокот го решаваме заземјувачот со помош на `zaz`, а потоа со командата `meshgrid` ја дефинираме бараната област со чекор од 0,5 m.

programi/zaz/kvadrat_inka.m

```
1 [R,Rz,Uz,I,L] = zaz('kvadrat_d');
2 I = [I; I];
3 rho = 100;
4 [X,Y] = meshgrid(-5:0.5:15, -5:0.5:15);
5 [m,n] = size(X);
6 fi = zeros(m,n);
7 for i = 1:m
8     for j = 1:n
9         T = [X(i,j) Y(i,j) 0];
10        fi(i,j) = pot_tocka(T,I,L,rho)/Uz*100;
11    end
12 end
13 figure; surf(X,Y,fi);
14 figure; [c,h] = contour(X,Y,fi,0:5:100); clabel(c,h); colorbar;
```

Потоа, во двоен for циклус ги пресметуваме потенцијалите во сите точки од областа со функцијата `pot_tocka`. Цртањето на потенцијалната инка се прави со командата `surf(X,Y,fi)`, додека еквипотенцијалните линии се добиваат со `contour(X,Y,fi,0:5:100)`, при што линиите се цртаат за потенцијали од 0 до 100% со чекор од 5%.



Слика П.3.7.1. Потенцијална инка и еквипотенцијални линии на заземјувач во форма на квадрат

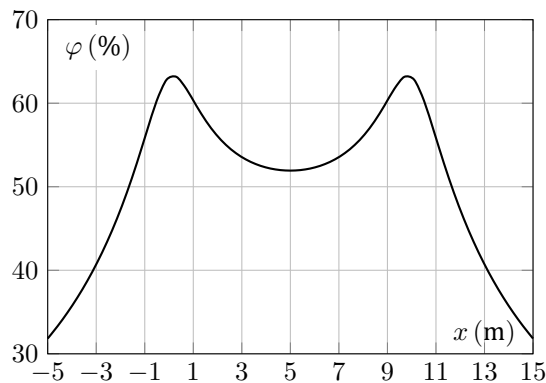


Пример 3.8. За зазмјувачот од примерот 3.6 да се нацрта промената на потенцијалот на површината на земјата по права линија од точката (-5,5) до точката (15,5). Пресметките да се направат за 50 точки по должина на линијата, а потенцијалите да се изразат во проценти од напонот на заземјувачот.

Решение

programi/zaz/kvadrat_potlin.m

```
1 [R,Rz,Uz,I,L] = zaz('kvadrat_d');
2 I = [I; I];
3 rho = 100;
4 X = linspace(-5,15,50);
5 for i = 1:50
6     fi(i) = pot_tocka([X(i) 5 0],I,L,rho)/Uz*100;
7 end
8 plot(X,fi); grid
```



Слика П.3.8.1. Промена на потенцијалот по права линија на средина на заземјувач во форма на квадрат



Пример 3.9. За заземјувач во форма на квадрат поставен во тло со $\rho = 100 \Omega\text{m}$ да се нацрта зависноста на отпорноста R_z во функција од должината на страната на квадратот a . Да се земе дека a се менува од 2 m до 20 m со чекор од 1 m.

Решение

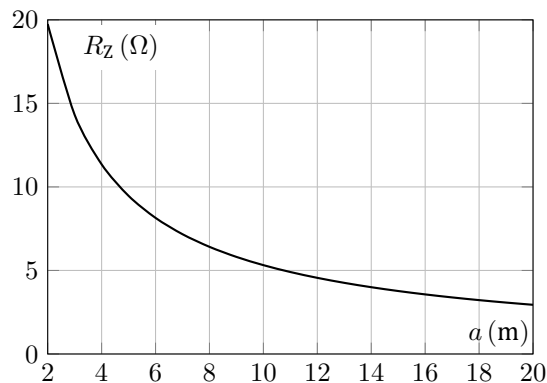
Зависноста на R_z од должината на страната a ќе ја добиеме со програмата која е дадена во продолжение. Во неа прво ја вчитуваме

структурата Z од датотеката `kvadrat_d.m`, а потоа со командата `i = find(Z.L == 10)` одредуваме на кои позиции во матрицата L се наоѓа бројот 10 затоа што тоа е должината на страната на квадратот во таа датотека.

Потоа, во `for` циклус ги менуваме вредностите на матрицата L на позициите дадени во `i` со вредности од 2 до 20, така што добиваме квадрати со различни димензии. Заземјувачот го решаваме со `zaz`, а резултатот е прикажан на сликата П.3.9.1.

programi/zaz/kvadrat_promenliv.m

```
1 Z = feval('kvadrat_d');
2 i = find(Z.L == 10);
3 Rz_site = [];
4 for a = 2:20
5     Z.L(i) = a;
6     [R, Rz] = zaz(Z);
7     Rz_site = [Rz_site; Rz];
8 end
9 plot(2:20,Rz_site); grid
```



Слика П.3.9.1. Зависност на отпорноста на распространување на заземјувач во форма на квадрат од должината на неговата страница

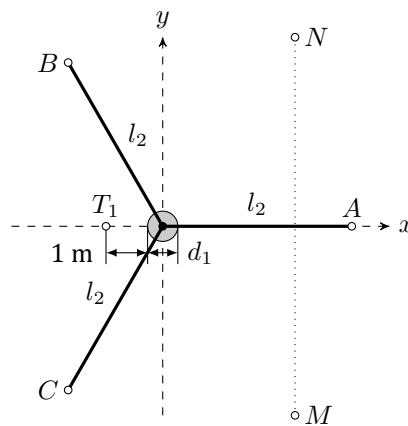


Пример 3.10. Еден армирано-бетонски столб од надземен вод е поставен во тло со специфична отпорност $\rho = 180 \Omega\text{m}$. Должината на делот од столбот закопан во земјата изнесува $l_1 = 2 \text{ m}$ и тој може да се еквивалентира со метален цилиндер со пречник $d_1 = 30 \text{ cm}$. столбот е заземјен со 3 поцинкувани ленти закопани на длабочина $h = 1 \text{ m}$. Лентите формираат симетрична ѕвезда, нивната должина е $l_2 = 10 \text{ m}$ и тие се со димензии $30 \times 4 \text{ mm}$ ($d_2 = 22 \text{ mm}$). Во заземјувачот се инјектира струја на грешка $I_Z = 240 \text{ A}$.

За заземјувачот се познати матриците

$$\mathbf{r} = \begin{bmatrix} 47,0 & 9,1 & 9,1 & 9,1 \\ 9,1 & 23,8 & 4,1 & 4,1 \\ 9,1 & 4,1 & 23,8 & 4,1 \\ 9,1 & 4,1 & 4,1 & 23,8 \end{bmatrix} \Omega; \quad \mathbf{y} = \begin{bmatrix} 25 & -7 & -7 & -7 \\ -7 & 46 & -4 & -4 \\ -7 & -4 & 46 & -4 \\ -7 & -4 & -4 & 46 \end{bmatrix} \cdot 10^{-3} \text{ S},$$

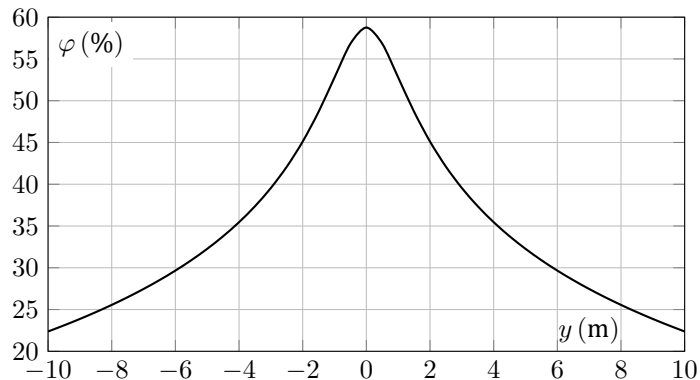
во кои првата редица и колона се однесуваат на делот од столбот закопан во земјата.



Слика П.3.10.1

Да се одреди:

- Отпорноста на распростирање R_Z и напонот на заземјувачот U_Z ,
- Струите на одведување во земјата од одделните електроди на заземјувачот,
- Напонот на допир во точката T_1 на површината на земјата која се наоѓа на оддалеченост од 1 m од работ на столбот (слика П.3.10.1). Да се земе предвид и пречникот на столбот,
- Да се пресмета веројатноста за смртен исход за човек кој е изложен на напон на допир во точката T_1 ако времето на реагирање на заштитата е 0,4 секунди. Отпорноста на човекот изнесува 1000 Ω ,
- Најголемиот напон на чекор ако е позната промената на потенцијалот на површината на земјата по правецот $M - N$, при што координатите на точките се $M(7, -10)$ и $N(7, 10)$. Кривата на промена на потенцијалот е прикажана на сликата П.3.10.2, а бројните вредности се дадени во табелата П.3.10.1,
- Напонот на заземјувачот во случајот кога заземјувачот би имал само една лента наместо три.



Слика П.3.10.2

Табела П.3.10.1

y (m)	0	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0
φ (%)	58,8	56,8	52,8	48,7	45,1	42,1	39,5	37,4	35,5	33,8	32,3
y (m)	5,5	6,0	6,5	7,0	7,5	8,0	8,5	9,0	9,5	10,0	
φ (%)	30,9	29,7	28,5	27,5	26,5	25,6	24,7	23,9	23,1	22,4	

Решение

а) Отпорноста на распростирање на заземјувачот R_Z е реципрочна вредност од сумата на сите елементи на матрицата y , додека напонот на заземјувачот е производ од отпорноста и инјктираната струја I_Z

$$R_Z = \frac{1}{\sum_{i=1}^4 \sum_{j=1}^4 y_{ij}} = \frac{1}{(25 + 3 \cdot 46 - 6 \cdot 7 - 6 \cdot 4) \cdot 10^{-3}} = 10,309 \Omega,$$

$$U_Z = R_Z \cdot I_Z = 10,309 \cdot 240 = 2474,227 \text{ V}.$$

б) Струите на одведување на одделните електроди на заземјувачот можеме да ги добиеме како производ од сумата на колоните на матрицата y и напонот на заземјувачот U_Z . Според тоа имаме

$$I = y \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} \cdot U_Z = \begin{bmatrix} 25 - 7 - 7 - 7 \\ 46 - 7 - 4 - 4 \\ 46 - 7 - 4 - 4 \\ 46 - 7 - 4 - 4 \end{bmatrix} \cdot 10^{-3} \cdot 2474,227 = \begin{bmatrix} 9,897 \\ 76,701 \\ 76,701 \\ 76,701 \end{bmatrix} \text{ A}.$$

в) Точката T_1 ги има следните координати $T_1(-1,15;0;0)$. Делот од столбот закопан во земјата се наоѓа помеѓу точки со следните

координати $O(0, 0, 0)$ и $O_1(0, 0, -2)$. Трите ленти почнуваат во точката $O_2(0, 0, -1)$, а завршуваат во точките $A(10, 0, -1)$, $B(-5, 5\sqrt{3}, -1)$ и $C(-5, -5\sqrt{3}, -1)$ соодветно.

Потенцијалот од делот од столбот закопан во земјата изнесува

$$r_1 = \sqrt{(0 - (-1.15))^2 + (0 - 0)^2 + (0 - 0)^2} = 1,15 \text{ m},$$

$$r_2 = \sqrt{(0 - (-1.15))^2 + (0 - 0)^2 + (-2 - 0)^2} = 2,307 \text{ m},$$

$$\varphi_1 = \frac{\rho \cdot I_1}{4\pi l_1} \ln \frac{r_1 + r_2 + l_1}{r_1 + r_2 - l_1} = \frac{180 \cdot 9,897}{4\pi \cdot 2} \ln \frac{1,15 + 2,307 + 2}{1,15 + 2,307 - 2} = 93,601 \text{ V}.$$

За потенцијалот создаден од лентата $\overline{O_2A}$ добиваме

$$r_1 = \sqrt{(0 - (-1.15))^2 + (0 - 0)^2 + (-1 - 0)^2} = 1,524 \text{ m},$$

$$r_2 = \sqrt{(10 - (-1.15))^2 + (0 - 0)^2 + (-1 - 0)^2} = 11,195 \text{ m},$$

$$\varphi_2 = \frac{\rho \cdot I_2}{4\pi l_2} \ln \frac{r_1 + r_2 + l_2}{r_1 + r_2 - l_2} = \frac{180 \cdot 76,701}{4\pi \cdot 10} \ln \frac{1,524 + 11,195 + 10}{1,524 + 11,195 - 10} = 233,239 \text{ V}.$$

Потенцијалот создаден од лентата $\overline{O_2B}$ е следниот

$$r_1 = \sqrt{(0 - (-1.15))^2 + (0 - 0)^2 + (-1 - 0)^2} = 1,524 \text{ m},$$

$$r_2 = \sqrt{(-5 - (-1.15))^2 + (5\sqrt{3} - 0)^2 + (-1 - 0)^2} = 9,53 \text{ m},$$

$$\varphi_3 = \frac{\rho \cdot I_3}{4\pi l_2} \ln \frac{r_1 + r_2 + l_2}{r_1 + r_2 - l_2} = \frac{180 \cdot 76,701}{4\pi \cdot 2} \ln \frac{1,524 + 9,53 + 2}{1,524 + 9,53 - 2} = 328,994 \text{ V}.$$

За вкупниот потенцијал, водејќи сметка и за ликовите на одделните елементи, можеме да напишеме

$$\varphi = 2 \cdot \varphi_1 + 2 \cdot \varphi_2 + 4 \cdot \varphi_3 = 2 \cdot 93,601 + 2 \cdot 233,239 + 4 \cdot 328,994 = 1969,656 \text{ V}.$$

На крајот за напонот на допир добиваме

$$U_d = \frac{U_Z - \varphi}{1 + 1,5 \cdot 10^{-3} \cdot \rho} = \frac{2474,227 - 1969,656}{1 + 1,5 \cdot 10^{-3} \cdot 180} = 397,3 \text{ V}.$$

г) Познавајќи го напонот на допир и сметајќи со отпорност на човековото тело од 1000Ω за струјата низ човекот имаме

$$I = \frac{397,3}{1000} = 397,3 \text{ mA},$$

а според времето на реагирање на заштитата од $0,4$ секунди за струјата која предизвикува фибрилација со веројатност од 50% добиваме

$$I_{F50} = \frac{0,16}{0,4} = 400 \text{ mA}.$$

Според тоа x изнесува

$$x = \frac{1}{0,18} \log \frac{I}{I_{F50}} = \frac{1}{0,18} \log \frac{397,3}{400} = -0,0163,$$

а веројатноста за смртен исход е $p = F(x) = 0,5$.

д) Од кривата на промена на потенцијалот по должина на патеката \overline{MN} забележуваме дека таа најстрмно се менува во околината на $y = 0$. Поради тоа одредуваме разлики од потенцијали на парови точки на растојание од 1 m почнувајќи со првата точка од табелата. Така добиваме

$$\begin{aligned}\Delta\varphi_1 &= \varphi(y=0) - \varphi(y=1) = 58,8 - 52,8 = 6 \%, \\ \Delta\varphi_2 &= \varphi(y=0,5) - \varphi(y=1,5) = 56,8 - 48,7 = 8,1 \%, \\ \Delta\varphi_3 &= \varphi(y=1) - \varphi(y=2) = 52,8 - 45,1 = 7,7 \%, \\ \Delta\varphi_4 &= \varphi(y=1,5) - \varphi(y=2,5) = 48,7 - 42,1 = 6,6 \%, \\ &\vdots\end{aligned}$$

од каде што заклучуваме дека најголемата потенцијална разлика на чекор е $E_{c.\max} = 8,1 \%$. Оттука за напонот на чекор имаме

$$\begin{aligned}E_c &= \frac{8,1}{100} \cdot U_Z = \frac{8,1}{100} \cdot 2474,227 = 200,412 \text{ V}, \\ U_c &= \frac{E_c}{1 + 6 \cdot 10^{-3} \cdot \rho} = \frac{200,412}{1 + 6 \cdot 10^{-3} \cdot 180} = 96,352 \text{ V}.\end{aligned}$$

ѓ) Во случај кога би останала само една лента во заземјувачот матрицата r ќе биде следната

$$r = \begin{bmatrix} 47,0 & 9,1 \\ 9,1 & 23,8 \end{bmatrix} \Omega,$$

а нејзината инверзна матрица е

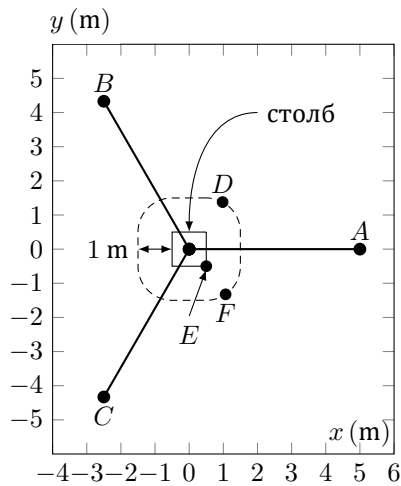
$$y = r^{-1} = \begin{bmatrix} 0,023 & -0,009 \\ -0,009 & 0,045 \end{bmatrix} \text{ S}.$$

Понатаму, постапувајќи идентично како под а) добиваме

$$\begin{aligned}R_Z &= \frac{1}{(23 + 45 - 2 \cdot 9) \cdot 10^{-3}} = 20 \Omega, \\ U_Z &= R_Z \cdot I_Z = 20 \cdot 240 = 4800 \text{ V}.\end{aligned}$$

□ □ □

Пример 3.11. Челично-решеткаст столб има заземјувач во форма на правилна трикрака звезда со должина на краците од 5 m (слика П.3.11.1). Краците се направени од бакарен спроводник со пречник од 9 mm и се закопани на длабочина од 1 m во земја со $\rho = 100 \Omega\text{m}$. Координатите на крајните точки од јажињата се $A(5, 0)$, $B(-5/2, 5\sqrt{3}/2)$ и $C(-5/2, -5\sqrt{3}/2)$. На површината на земјата телото на столбот има форма на квадрат со страница од 1 m. Да се одреди максималната потенцијална разлика на допир $E_{d,\max}$ на линија оддалечена 1 m од столбот (испрекината линија на сликата). Да се пресмета и максималната потенцијална разлика на чекор $E_{c,\max}$ во околината на заземјувачот во просторот надвор од телото (габаритот) на столбот.



Слика П.3.11.1

Решение

programi/zaz/zraci3.m

```

1 function Z = zraci3()
2 Z.Iz = 10;
3 Z.rho = 100;
4 Z.L = [
5     0  0  -1  5  0  -1  9
6     0  0  -1 -2.5 5*sqrt(3)/2 -1  9
7     0  0  -1 -2.5 -5*sqrt(3)/2 -1  9
8     ];
9 Z.gabarit = [
10    0.5  0.5
11   -0.5  0.5
12   -0.5 -0.5
13    0.5 -0.5
14    0.5  0.5
15   ];

```

Податоците за заземјувачот се дадени во датотеката `zraci3.m`. Во неа, покрај податоците кои ги опишавме во претходните пример, додадена е матрицата `Z.gabarit` во која се дадени координатите на точките од габаритот на столбот.

Во програмата `zraci3_ed.m` со помош на функцијата `extendPoly` се формираат векторите X и Y во кои се дадени x и y координатите на точките од непрекинатата линија која се наоѓа на 1 m од оградата. За сите точки се пресметува потенцијалната разлика на допир и се одредува најголемата вредност, како и позицијата на која таа се појавува. На таков начин добиваме $E_{d,max} = 49,2\%$, при што таа вредност се појавува во точката $D(0,98; 1,38)$.

programi/zaz/zraci3_ed.m

```
1 Z = zraci3;
2 [R,Rz,Uz,I,L] = zaz(Z);
3 I = [I; I];
4 izlez = extendPoly(Z.gabarit,1,0.1);
5 XY = izlez{1,1}; [X,Y] = deal(XY(:,1),XY(:,2));
6 for i = 1:length(X)
7     Ed(i) = 100 - pot_tocka([X(i) Y(i) 0],I,L,Z.rho)/Uz*100;
8 end
9 [Edmax, i] = max(Ed); Xi = X(i); Yi = Y(i);
```

programi/zaz/zraci3_ec.m

```
1 Z = zraci3;
2 [R,Rz,Uz,I,L] = zaz(Z);
3 I = [I; I];
4 [X,Y] = meshgrid(-7:0.25:7, -7:0.25:7);
5 [m,n] = size(X);
6 fi = zeros(m,n);
7 for i = 1:m
8     for j = 1:n
9         T = [X(i,j) Y(i,j) 0];
10        fi(i,j) = pot_tocka(T,I,L,Z.rho)/Uz*100;
11    end
12 end
13 [Gx, Gy] = gradient(-fi,0.25,0.25);
14 Ec = sqrt(Gx.^2 + Gy.^2);
15 vo = inpolygon(X,Y,Z.gabarit(:,1),Z.gabarit(:,2));
16 Ec = Ec.*vo;
17 Emax = max(Ec(:));
18 i = find(Ec == Emax);
19 Xi = X(i); Yi = Y(i);
20 Xj = Xi + Gx(i)/Emax;
21 Yj = Yi + Gy(i)/Emax;
```

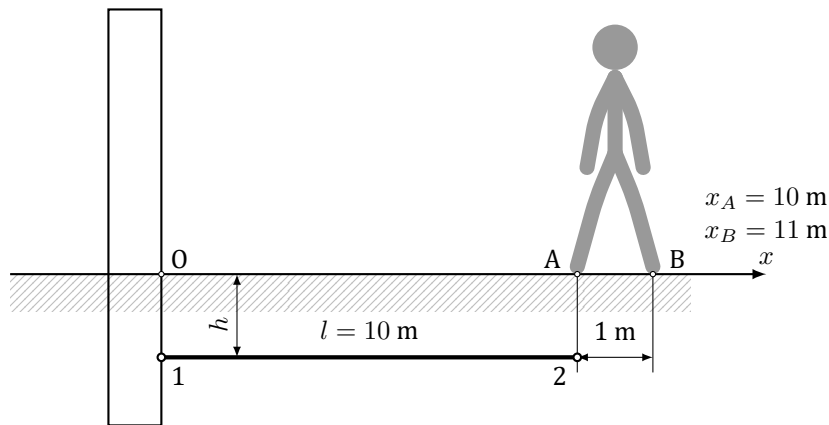
Најголемата потенцијална разлика на чекор ја добиваме со програмата `zraci3_ec.m` во која прво пресметуваме потенцијал во точки од областа $x \in [-7, 7]$ и $y \in [-7, 7]$. Потоа го пресметуваме градиентот на потенцијалот, т.е. стрмнината на промена на потенцијалот која во суштина ја претставува потенцијалната разлика на чекор. Пресметката

на градиентот ја правиме со помош на функцијата `gradient` која ги определува компонентите на градиентот G_x и G_y во правец на x и y оската. Модулот на градиентот, т.е. потенцијалната разлика на чекор, ја добиваме како $E_c = \sqrt{G_x.^2 + G_y.^2}$. На крајот, за точки кои се надвор од зоната дефинирана со оградата ја одредуваме максималната потенцијална разлика на чекор и точките во кои ја има таа вредност. Така добиваме $E_{c,max} = 8,8\%$, при што таа вредност се има помеѓу точките $E(0, 5; -0, 5)$ и $F(1, 07; -1, 32)$.

□ □ □

Пример 3.12. На сликата П.3.12.1 е прикажан заземјувач од еден дрвен столб на СН надземен вод. Заземјувачот е изведен од бакарно јаже $Cu50\text{ mm}^2$ со должина l и пречник d , закопано на длабочина h во хомогено тло со специфична отпорност ρ . Да се пресмета отпорноста на распространување на заземјувачот R_Z и напонот U_Z под дејство на струјата на доземен спој I_Z . Колкав ќе биде потенцијалот во точката „А“ на површината од земјата, а колкав напонот на чекор во тој случај. Дали е можно поради превисок напон на чекор да дојде до несреќен случај ако земјоспојот трае повеќе од 1 s.

Бројни вредности: $l = 10\text{ m}$, $h = 1\text{ m}$, $d = 9\text{ mm}$, $I_Z = 30\text{ A}$, $\rho = 300\ \Omega\text{m}$, $x_A = 10\text{ m}$, $y_A = 0$, $z_A = 0$.



Слика П.3.12.1

Решение

Како што беше изложено во точката 3.4, ограниченоста на земјата како средина се опфаќа со воведување на уште еден заземјувач, наречен лик, со исти карактеристики како и „оригиналот“ и иста

струја на одведување, поставен симетрично во однос на површината на земјата. Поради тоа елементите од матрицата на отпорностите r ќе се пресметуваат со помош на релацијата (3.38) додека потенцијалите во точки на површината од земјата ќе се пресметуваат со релацијата (3.40), како суперпозиција од потенцијалите што ги создаваат елементите од заземјувачот и нивните ликови.

Во конкретниов случај заземјувачот е составен од само еден елемент поради што матрицата r на заземјувачот ќе има само еден елемент, r_{11} . Неговата вредност, во согласност со (3.38), ќе биде

$$r_{11} = \alpha_{11} + \alpha_{11'}$$

Сопствената отпорност α_{11} , исто како и во примерот 3.3, се пресметува со релацијата

$$\alpha_{11} = \alpha_s = \frac{\rho}{2\pi l} \cdot \ln \frac{2l}{d} = \frac{300}{2\pi \cdot 10} \cdot \ln \frac{2 \cdot 10}{0,009} = 36,795 \Omega.$$

Заемната отпорност $\alpha_{11'}$ помеѓу елементот и неговиот лик ќе се пресметаат како и во примерот 3.1

$$\alpha_m = \frac{\rho}{4\pi l^2} \int_{x_1}^{x_2} \int_{\xi_1}^{\xi_2} \frac{dx \cdot d\xi}{r} = \frac{\rho}{2\pi l^2} \left[l \cdot \ln \frac{D}{\sqrt{l^2 + D^2} - l} + D - \sqrt{l^2 + D^2} \right].$$

Бидејќи во случајов растојанието помеѓу заземјувачот и неговиот лик изнесува $D = 2h$, со замена на бројните вредности за ρ , D и l се добива

$$\alpha_{11'} = \frac{300}{2\pi \cdot 10^2} \cdot \left[2 - \sqrt{10^2 + 2^2} + 10 \cdot \ln \frac{2}{\sqrt{10^2 + 2^2} - 10} \right] = 7,127 \Omega.$$

И конечно, со оглед на (3.38), добиваме

$$r_{11} = \alpha_{11} + \alpha_{11'} = 36,795 + 7,127 = 43,922 \Omega.$$

Отпорноста на распростирање R_Z и напонот U_Z на заземјувачот во случајов ќе бидат

$$R_Z = r_{11} = 43,922 \Omega; \quad U_Z = R_Z \cdot I_Z = 43,922 \cdot 30 = 1317,66 \text{ V}.$$

Интересно би било овој резултат, којшто можеме да го третираме како „точен“, да го споредиме со резултатот што го дава приближната формула за пресметка на отпорноста на распростирање на хоризонтално закопан спроводник. Според приближната формула ќе имаме

$$R_Z = \frac{\rho}{\pi \cdot l} \cdot \ln \frac{l}{\sqrt{h \cdot d}} = \frac{300}{\pi \cdot 10} \cdot \ln \frac{10}{\sqrt{1 \cdot 0,009}} = 44,479 \Omega.$$

Значи со приближната формула го добивме практично истиот резултат, (со грешка од само 1,3%), но на многу поедноставен начин.

Понатаму со R_{1A} го означиме растојанието од левиот раб на заземјувачот до точката А, додека со R_{2A} го означиме растојанието од десниот раб на заземјувачот до точката А. Тогаш, со оглед на сликата П.3.12.1, ќе имаме:

$$R_{1A} = \sqrt{l^2 + h^2} = \sqrt{10^2 + 1^2} = 10,05 \text{ m};$$

$$R_{2A} = h = 1 \text{ m};$$

$$R_{12} = R_{1A} + R_{2A} = 11,05 \text{ m}.$$

Потенцијалот φ_A во точката А на површина на земјата со координати $x_A = l/2 = 5 \text{ m}$, $y_A = 0$ и $z_A = 0$, со оглед на (3.40) и сликата П.3.12.1, ќе биде

$$\begin{aligned} \varphi_A &= 2 \cdot \alpha_{iA} = 2 \cdot \frac{\rho \cdot I_Z}{4\pi \cdot l} \cdot \ln \frac{R_{1A} + R_{2A} + l}{R_{1A} + R_{2A} - l} = \\ &= \frac{\rho \cdot I_Z}{2\pi l} \cdot \ln \frac{R_{12} + l}{R_{12} - l} = \frac{300 \cdot 30}{2\pi \cdot 10} \cdot \ln \frac{11,05 + 10}{11,05 - 10} = 429,45 \text{ V}. \end{aligned}$$

На сличен начин се добива и потенцијалот во точката В на површина од земјата. Во овој случај ќе имаме

$$R_{1B} = \sqrt{(l+1)^2 + h^2} = \sqrt{11^2 + 1^2} = 11,045 \text{ m};$$

$$R_{2B} = \sqrt{1 + h^2} = 1,414 \text{ m};$$

$$R_{12} = R_{1B} + R_{2B} = 12,459 \text{ m},$$

$$\varphi_B = 316,83 \text{ V}.$$

Потенцијалната разлика на чекор E_c на која што ќе биде изложен човекот кој што со стопалата ги премостил точките А и В за време на земјоспојот ќе биде

$$E_c = \varphi_A - \varphi_B = 429,45 - 316,83 = 112,62 \text{ V},$$

што изнесува 8,55% од напонот на заземјувачот.

Напонот на чекор U_c на кој што ќе биде изложен човекот кој што со стопалата ги премостил точките А и В за време на земјоспојот ќе биде

$$s_c = 1 + 0,006 \cdot \rho = 1 + 1,8 = 2,8;$$

$$U_c = \frac{E_c}{s_c} = \frac{112,62}{2,8} = 40,2 \text{ V}.$$

Бидејќи $U_c < 65 \text{ V}$, произлегува дека реална опасност од превисок напон на чекор во тој случај не постои. Бидејќи градиентот, т.е.

стрмнината, на кривата $\varphi(x)$ на површината од земјата е најголем токму во тој дел, произлегува дека општо, за целата област околу заземјувачот, реална опасност за луѓето да бидат изложени на превисоки напони на чекор за време на земјоспојот не постои.

Всушност поточните пресметки покажуваат дека најголемата потенцијална разлика на чекор изнесува 9,38% од потенцијалот на заземјувачот и се добива малку полево, помеѓу точките со координати 9,5 и 10,5 m

$$E_{c.\max} = \varphi_{x=9,5} - \varphi_{x=10,5} = 491,1 - 367,5 = 123,6 \text{ V (9,38\%)}$$

Меѓутоа и во овој случај напонот на чекор, којшто изнесува:

$$U_{c.\max} = \frac{123,6}{2,8} = 44,1 \text{ V}$$

е повторно помал од дозволените 65 V кои што се сметаат за горна граница на дозволените (безопасни) вредности.

Со помош на следната програма

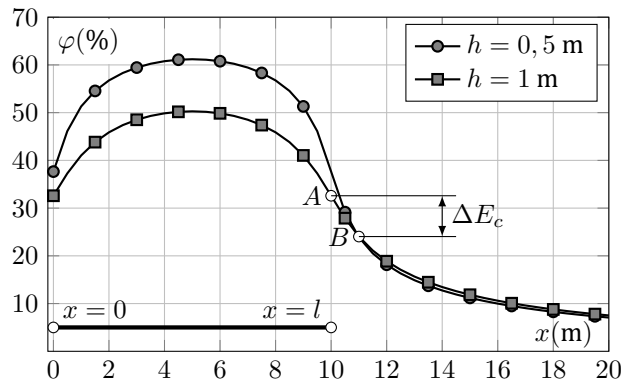
programi/zaz/resi_lenta.m

```
1 [R,Rz,Uz,I,L] = zaz('lenta');
2 I = [I; I];
3 rho = 300;
4 x = linspace(0,20,41);
5 for i=1:length(x)
6     fi(i) = pot_tocka([x(i) 0 0],I,L,rho)/Uz*100;
7 end
8 plot(x,fi);
```

е пресметана зависноста $\varphi(x)$ на потенцијалот на површината од земјата по должината на x оската. Оваа зависност е графички прикажана на сликата П.3.12.2. Притоа горната крива се однесува на случајот кога длабочината на закопување на заземјувачот изнесува $h = 0,5$ m, додека долната крива се однесува на случајот $h = 1$ m. Во програмата се користени следните податоци за заземјувачот

programi/zaz/lenta.m

```
1 function Z = lenta()
2 Z.Iz = 30;
3 Z.rho = 300;
4 Z.L = [
5     0 0 -1 10 0 -1 9
6     ];
```



Слика П.3.12.2. Зависност на потенцијалот по должината на x оската

□ □ □

Задача 3.2. Заземјувачот во форма на рамностран триаголник, анализиран во примерот 3.3, е поставен во земјата хоризонтално, закопан на длабочина $h = 1$ m. Да се пресметаат елементите од матрицата r на заземјувачот водејќи сметка и за влијанието на дисконтинуитетот на средината, т.е. за присуството на неговиот лик. Колкава ќе биде отпорноста на распростирање на заземјувачот R_Z во овој случај? Колкав ќе биде неговиот потенцијал U_Z , а колкав потенцијалот φ_T во тежиштето T на заземјувачот на површината од земјата, при иста струја на одведување од заземјувачот во земјата $I_Z = 10$ A.

Напомена: Задачата да се реши со програмата zaz.

□ □ □

3.3 Програма за решавање заземјувачи

3.3.1 Влезни податоци

Во продолжение ќе прикажеме програма за решавање на заземјувачи која е направена во Matlab. Таа може да се симне од следната локација

<http://pees.feit.ukim.edu.mk/predmeti/zs/zazem.zip>

Во неа податоците за заземјувачите се задаваат во форма на функција која е без влезни аргументи, а како излез ја дава структурата Z како што е дадено во следниот пример

```
function Z = z_lenta()
Z.rho = 200;
Z.Iz = 50;
Z.objekti = [
-5  0 -1  5  0 -1  22
];
```

```
Z.gabarit = [
    0.5 0.5
   -0.5 0.5
   -0.5 -0.5
    0.5 -0.5
    0.5 0.5
];
Z.tocki = [
    0 1 0
    5 1 0
   10 -1 0
];
Z.linii = [
   -10 0 10 0 0.2
    0 -5 0 5 0.2
];
```

Полињата во структурата Z го имаат следното значење

rho Специфична отпорност на тлото $\rho(\Omega m)$.

Iz Струја која се инјектира во заземјувачот $I_Z(A)$.

objekti

Матрица со податоци за спроводниците. Во првите 6 колони се дадени x , y и z координатите на крајните точки од секој спроводник (изразени во m), а во колоната 7 е дијаметарот на спроводникот (изразен во mm). Со функцијата `z_lenta` е дефиниран заземјувач кој се состои од една лента која почнува во точката $(-5, 0, -1)$, а завршува во точката $(5, 0, -1)$. Нејзиниот дијаметар е 22 mm.

tocki Матрица со која се дефинирани точки на површината на земјата во кои сакаме да пресметаме потенцијал. Таа има 3 колони во кои се задаваат x , y и z координатите на точките (изразени во m).

linii Матрица со која се дефинирани линии на површината на земјата по чија должина сакаме да ја прикажеме промената на потенцијалот. Таа има 5 колони и во неа се задаваат: (x_1, y_1) – координати на почетната точка, (x_2, y_2) – координати на крајната точка, Δ – чекор за цртање по должина на линијата. Сите димензии се изразени во m.

Ако нема потреба за пресметување на потенцијали во точки и по линии тогаш матриците `tocki` и `linii` може и да не се зададат.

Внесувањето на податоците во матрицата `objekti` можеме да го поедноставиме со користење на функциите `linija`, `pravoagolnik`, `krug`, `z_rasi` или `sondi`. Тоа можеме да го направиме на следниот начин

```
Z.objekti = [
    pravoagolnik([0 0 -0.5],5,5,9)
    linija([2.5 0 -0.5],[7.5 0 -0.5], 9)
];
```


Функција linija

`L = linija(A,B,d)`

Функцијата служи за дефинирање на матрицата L за линија со крајни точки A и B и дијаметар d.

```
>> L = linija([-5 0 -1], [5 0 -1], 22)
```

```
L =  
-5    0    -1    5    0    -1    22
```

Функција pravoagolnik

`L = pravoagolnik(C,a,b,d)`

Функцијата служи за дефинирање на матрицата L за правоаголник со центар во точката C, должина по хоризонтала a, ширина b и дијаметар на спроводникот d.

```
>> L = pravoagolnik([0 0 -1], 5, 5, 9)
```

```
L =  
-2.5000  -2.5000  -1.0000  -2.5000   2.5000  -1.0000   9.0000  
-2.5000   2.5000  -1.0000   2.5000   2.5000  -1.0000   9.0000  
 2.5000   2.5000  -1.0000   2.5000  -2.5000  -1.0000   9.0000  
 2.5000  -2.5000  -1.0000  -2.5000  -2.5000  -1.0000   9.0000
```

Функција krug

`L = krug(C,r,d,m)`

Функцијата служи за дефинирање на матрицата L за круг со центар во точката C, радиус r, и дијаметар на спроводникот d. Кругот се апроксимира со правилен многуаголник, при што бројот на страни е m. Ако не се внесе m се зема вредност 8.

```
>> L = krug([0 0 -1], 1, 9)
```

```
L =  
 1.0000         0  -1.0000   0.7071   0.7071  -1.0000   9.0000  
 0.7071   0.7071  -1.0000   0.0000   1.0000  -1.0000   9.0000  
 0.0000   1.0000  -1.0000  -0.7071   0.7071  -1.0000   9.0000  
-0.7071   0.7071  -1.0000  -1.0000   0.0000  -1.0000   9.0000  
-1.0000   0.0000  -1.0000  -0.7071  -0.7071  -1.0000   9.0000  
-0.7071  -0.7071  -1.0000  -0.0000  -1.0000  -1.0000   9.0000  
-0.0000  -1.0000  -1.0000   0.7071  -0.7071  -1.0000   9.0000  
 0.7071  -0.7071  -1.0000   1.0000         0  -1.0000   9.0000
```

Функција sondi

`L = sondi(C,a,b,l,d)`

Функцијата служи за дефинирање на матрицата L за сонди поставени во темињата на правоаголник со центар во точката C, должина по хоризонтала a и ширина b. Должината на сондите е l, а нивниот дијаметар е d.

```
>> L = sondi([0 0 -1], 7, 7, 2.5, 65)
```

```
L =  
-3.5000  -3.5000  -1.0000  -3.5000  -3.5000  -3.5000  65.0000  
-3.5000   3.5000  -1.0000  -3.5000   3.5000  -3.5000  65.0000  
 3.5000   3.5000  -1.0000   3.5000   3.5000  -3.5000  65.0000  
 3.5000  -3.5000  -1.0000   3.5000  -3.5000  -3.5000  65.0000
```

Функција `zraci`

```
L = zraci(C,m,l,d)
```

Функцијата служи за дефинирање на матрицата L за зракаст заземјувач со центар во тоцката C . Должината на зраците е l , нивниот дијаметар е d , а бројот на зраци е m .

```
>> L = zraci([0 0 -1], 3, 5, 9)
```

```
L =  
      0      0 -1.0000  5.0000      0 -1.0000  9.0000  
      0      0 -1.0000 -2.5000  4.3301 -1.0000  9.0000  
      0      0 -1.0000 -2.5000 -4.3301 -1.0000  9.0000
```

Функција `rotacija`

```
Lr = rotacija(L,C,alfa)
```

Функцијата прави ротација на елементите од матрицата L во $x - y$ рамнина. Ротацијата се прави околу тоцката C за агол α кој се задава во степени.

```
>> L = rotacija(pravoagolnik([0 0 -1], 5, 5, 9), [2.5 2.5], 45)
```

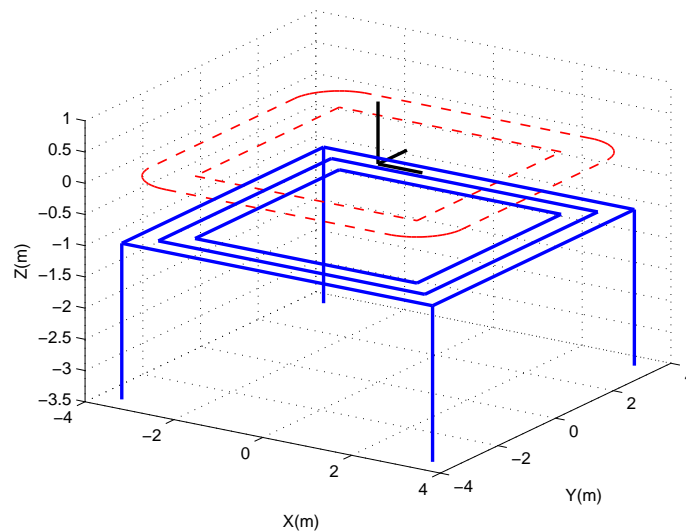
```
L =  
      2.5000 -4.5711 -1.0000 -1.0355 -1.0355 -1.0000  9.0000  
     -1.0355 -1.0355 -1.0000  2.5000  2.5000 -1.0000  9.0000  
      2.5000  2.5000 -1.0000  6.0355 -1.0355 -1.0000  9.0000  
      6.0355 -1.0355 -1.0000  2.5000 -4.5711 -1.0000  9.0000
```

Функција `crtaj_zazem`

```
crtaj_zazem(datoteka)
```

Со функцијата се црта заземјувач во 3 димензии заедно со затворените линии за оградата и зоната од 1 m околу неа. На пример, со командата `crtaj_zazem('z_3_konturi_sondi')`

ја добиваме следната слика



која е приказ на заземјувачот дефиниран со функцијата `z_3_konturi_sondi`. Во неа за геометријата на заземјувачот е напишано следното

```
C = [0 0 -1];
Z.objekti = [
    pravoagolnik(C, 5, 5, 9)
    pravoagolnik(C, 6, 6, 9)
    pravoagolnik(C, 7, 7, 9)
    sondi(C, 7, 7, 2.5, 65)
];
Z.gabarit = [
    2.5 2.5
    -2.5 2.5
    -2.5 -2.5
    2.5 -2.5
    2.5 2.5
];
```

3.3.2 Решавање на заземјувачот

Функцијата `zazem` служи за решавање на заземјувач со произволна форма. Таа се повикува на следниот начин

```
[r,Rz,Uz,I,L,E,Z] = zazem(datoteka,zapis,Xrange,Yrange)
```

Влезните променливи во функцијата `zazem` го имаат следното значење

`datoteka`

Име на датотеката во која се дадени податоците за заземјувачот. Се пишува без `.m` на крајот.

`zapis` Избор за запишување на резултатите во излезна датотека. Вредностите за оваа променлива може да бидат

0. Резултатите не се запишуваат.

1. Запишување во излезна датотека чиј прв дел од името е еднаков на променливата `datoteka`, а наставката е `txt`.

Ако променливата `zapis` не се зададе се смета дека таа е еднаква на 0.

`Xrange` Опсег на вредности за x координати во формат `-10 : 0.2 : 10` со кои се дефинира областа за пребарување при пресметка на потенцијалната разлика на чекор. Ако променливата `Xrange` не се зададе тогаш таа ќе биде автоматски одредена со функцијата `def_oblast` која е составен дел од програмскиот пакет `zazem`. Со неа, областа околу заземјувачот се дефинира врз основа на минималните и максималните координати на точките од матрицата `L`.

`Yrange` Опсег на вредности за y координати во формат `-10 : 0.2 : 10` со кои се дефинира областа за пребарување при пресметка на

потенцијалната разлика на чекор. Ако променливата Y_{range} не се зададе се зема $Y_{range} = X_{range}$.

Излезните променливи од функцијата `zazem` се следните

- r** Матрица на сопствени и меѓусебни отпорности.
- Rz** Отпорност на распростирање на заземјувачот.
- Uz** Потенцијал на заземјувачот.
- I** Вектор со струи на одведување од одделните спроводници на заземјувачот.
- L** Матрица со податоци за спроводниците. Во првите 6 колони се дадени x , y и z координатите на крајните точки од секој спроводник (изразени во m), а во колоната 7 е дијаметарот на спроводникот (изразен во mm).
- E** Структура со полиња `Ed_max`, `Ed_min`, `Ed_sr`, `Ec_max`, `Ec_min` и `Ec_sr` во која се дадени максималната, минималната и средната вредност на потенцијалните разлики на допир и чекор. Вредностите се изразени во % од потенцијалот на заземјувачот.

Доколку сакаме да го решиме заземјувачот `z_zraci`, без да го запишеме решението во излезна датотека, а при тоа да го определеме максималниот напон на чекор во областа $x \in [-10, 10]$, $y \in [-10, 10]$ ја пишуваме следната команда. Со неа во работниот простор ги добиваме сите излезни големини кои ги набројавме претходно, освен матрицата `L` за која во излезната листа го имаме ставено знакот `~`. Со функцијата `z_zraci` е дефиниран заземјувач со 3 краци со должина од 5 m и пречник на спроводникот од 9 mm. Таа се наоѓа во пакетот `zazem.zip`.

```
>> [r,Rz,Uz,I,~,E] = zazem('z_zraci',0,-10:0.2:10)
r =
    50.8234    8.4743    8.4743
     8.4743   50.8234    8.4743
     8.4743    8.4743   50.8234
Rz =
    22.5907
Uz =
    1.1295e+03
I =
    16.6667
    16.6667
    16.6667
E =
    Ed_max: 44.9029
    Ed_min: 40.5097
     Ed_sr: 42.8149
    Ec_max: 11.3423
    Ec_min: 0
     Ec_sr: 3.4747
```

3.3.3 Цртање на промена на потенцијалот во одредена област и по зададени линии

Функција `potencijal_inka`

`[X,Y,fi] = potencijal_inka(datoteka,Xrange,Yrange)`

Функцијата служи за цртање на потенцијалната инка околу заземјувачот. Таа воедно ги црта и еквипотенцијалните линии на површината на земјата. Нејзините влезни и излезни параметри го имаат следното значење

`datoteka`

Име на датотеката во која се дадени податоците за заземјувачот. Се пишува без `.m` на крајот.

`Xrange` Опсег на вредности за x координати во формат `-10 : 0.2 : 10` со кои се дефинира областа за пребарување при пресметка на потенцијалната разлика на чекор. Ако променливата `Xrange` не се зададе тогаш таа ќе биде одредена со функцијата `def_oblast`.

`Yrange` Опсег на вредности за y координати во формат `-10 : 0.2 : 10` со кои се дефинира областа за пребарување при пресметка на потенцијалната разлика на чекор. Ако променливата `Yrange` не се зададе се зема `Yrange = Xrange`.

`X` Матрица со определени x координати за задената област.

`Y` Матрица со определени y координати за задената област.

`fi` Матрица со пресметани потенцијали во точките од матриците `X` и `Y`. Вредностите се изразени во % од потенцијалот на заземјувачот.

На пример, со командата

```
[X,Y,fi] = potencijal_inka('z_lenta', -10:0.25:10);
```

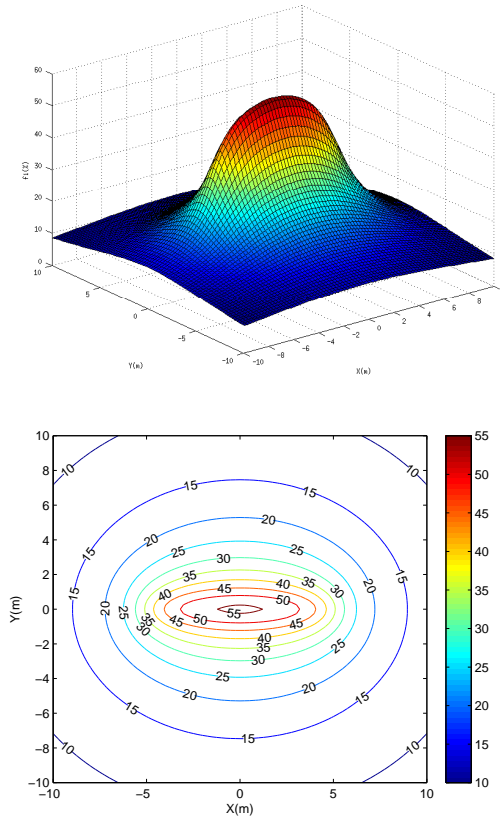
ја добиваме сликата 3.7.

Функција `pot_linii`

`pot_linii = potencijal_linija(datoteka,x1,y1,x2,y2,delta)`

Функцијата е наменета за цртање на промената на потенцијалот долж правец $(x1,y1)-(x2,y2)$ на површината на земјата со чекор `delta` за заземјувачот даден во датотеката `datoteka`. Ако се зададе само променливата `datoteka` тогаш се црта промената на потенцијалот по линиите зададени во неа во матрицата `Z.linii` која е дадена во структурата `Z` како што е наведено на почетокот на ова поглавје.

Како излез од функцијата се добива структурата `pot_linii` која има повеќе елементи со полиња `X`, `Y`, `L` и `fi`. Полињата се вектори во кои се дадени координатите x и y на точките по должина на



Слика 3.7. Потенцијална инка и еквипотенцијални линии на заземјувачот z_lenta

линијата, растојанието од почетната точка и вредноста на потенцијалот, соодветно.

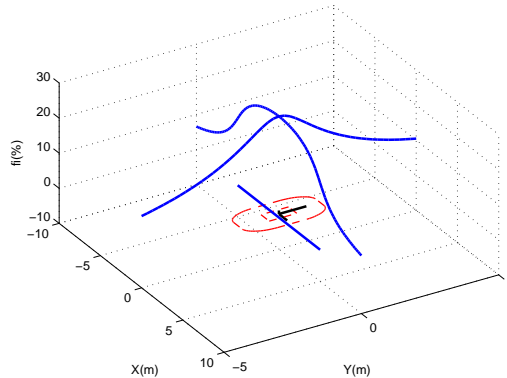
Покрај дводимензионални графици со промена на потенцијалот по секоја од линиите, функцијата црта и тридимензионална претстава за истите криви. За илустрација, со командата `pot_linii = potencijal_linija('z_lenta');`

е нацртана сликата 3.8 која всушност е пресек на потенцијалната инка од сликата 3.7 и две рамници кои се нормални на рамнината $x - y$ и поминуваат низ зададените линии.

Функција `potencijal_3d`

`[X, Y, Z, fi] = potencijal_3d(datoteka,Xrange,Yrange,Zrange)`

Функцијата пресметува потенцијал во точки од тридимензионална област околу заземјувачот.



Слика 3.8. Промена на потенцијалот по линии на површината од земјата кај заземјувачот z_{lenta}

Нејзините влезни и излезни параметри го имаат следното значење
datoteka

Име на датотеката во која се дадени податоците за заземјувачот. Се пишува без .m на крајот.

Xrange, Yrange, Zrange

Опсег на вредности за x , y и z координатите во формат $-10 : 0.2 : 10$ со кои се дефинира областа за пресметка на потенцијалите. Ако овие променливи не се зададат тогаш Xrange и Yrange се одредуваат со функцијата `def_oblast`, а за Zrange се задава областа на промена $-3 : 0.25 : 0$.

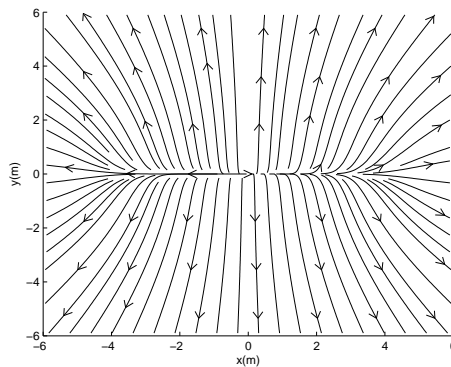
X, Y, Z Тридимензионални матрици со определени координати за задената област.

fi Тридимензионална матрица со пресметани потенцијали во точките од матриците X, Y и Z.

Познавањето на потенцијалот во просторот овозможува и пресметка на неговиот градиент со помош на функцијата `gradient`. Тоа значи дека многу лесно можеме да го добиеме електричното поле во просторот. Потоа, со помош на функцијата `streamslice` можеме да направиме пресек на електричното поле во зададена рамнина, така што можеме да ги видиме линиите на полето. Линиите на електричното поле се наедно и линиите на струјата така што ќе добиеме визуелна информација за течењето на струјата. Тоа можеме да го направиме со следната програма, со која е генерирана сликата 3.9.

programi/z_lenta_pole.m

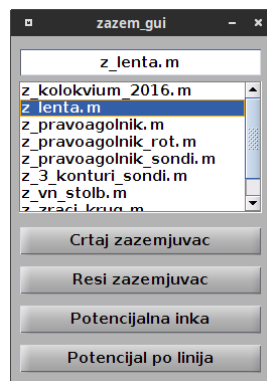
```
1 [X,Y,Z,fi] = ...  
2   potencijal_3d('z_lenta',-6:0.5:6,-6:0.5:6,-1.5:0.05:0);  
3 [U, V, W] = gradient(-fi,0.5,0.5,0.05);  
4 [vertices, arrowvertices] = streamslice(X,Y,Z,U,V,W,0,0,0);  
5 h = streamline([vertices arrowvertices]);  
6 set(h,'Color','black')  
7 xlabel('x(m)'); ylabel('y(m)')
```



Слика 3.9. Линии на струјата околу заземјувачот z_lenta

Избор и решавање на заземјувач преку форма

Во програмата е вградена и форма за графичко бирање на влезната датотека и можностите за цртање на заземјувачот, негово решавање и цртање на потенцијалната инка и распределбата на потенцијали по линија. Нејзиниот изглед е прикажан на сликата 3.10, а таа може да се активира со командата `zazem_gui`.



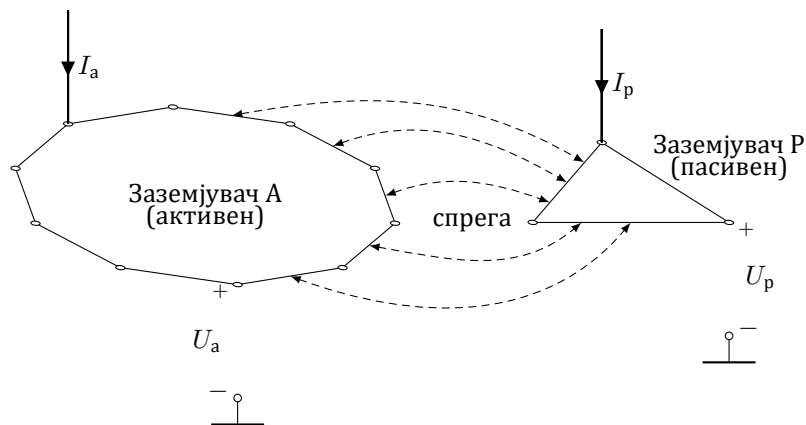
Слика 3.10. Форма за избор и решавање на заземјувач

4

РЕШАВАЊЕ НА СПРЕГНАТИ ЗАЗЕМЈУВАЧИ

4.1 Општо

Во практиката често пати се среќаваме со ситуација кога два или повеќе заземјувачи, кои немаат директна галванска врска, се наоѓаат доволно блиску во земјата (или како што се вели, си влегуваат во потенцијалните инки) така што си влијаат едниот врз другиот. Во тој случај ќе постои некаква кондуктивна спрега помеѓу нив т.е. состојбата од едниот заземјувач ќе влијае врз состојбата кај другиот – и обратно. Тогаш, велеме дека тие заземјувачи се кондуктивно спрегнати заземјувачи.



Слика 4.1. Активен (А) и пасивен (Р) заземјувач во заемна кондуктивна спрега

Еден заземјувач може да биде активен или пасивен. Активен е оној заземјувач којшто е поврзан со извор на напон или струја. Тогаш тој е извор (создавач) на струјното поле во земјата. Кога активниот заземјувач е поврзан со извор на струја (струен генератор) тогаш за него

е позната вкупната струја I_Z што се одведува во земјата од неговите елементи. Кога, пак, е поврзан со извор на напон, тогаш за него го знаеме колкав е неговиот напон U_Z т.е. неговиот потенцијал во однос на референтната земја.

Кога е активниот заземјувачот осамен, тогаш помеѓу напонот и струја на заземјувачот постои релацијата

$$U_Z = R_Z \cdot I_Z,$$

Но кога тој се наоѓа во спрега со друг(и) заземјувач(и), тогаш ќе видиме дека тој однос повеќе нема да важи, т.е. отпорноста на распростирање на заземјувачот ќе се промени.

Се покажува, на пример, дека отпорноста на распростирање на еден заземјувач се намалува кога во неговата близина се наоѓа друг, пасивен, заземјувач.

Нека активниот заземјувач го означиме како заземјувач А, а пасивниот како заземјувач Р. Пасивниот заземјувач не е приклучен на извор на напон или струја. Кај него најчесто вкупната струја на одведување во земјата е еднаква на нула, т.е. $I_p = 0$.

Постојат и ситуации кога е тој галвански поврзан со други, оддалечени, заземјувачи со поголеми димензии, или пак самиот тој има големи димензии така што неговиот потенцијал е приближно еднаков на нула ($U_p = 0$) и покрај тоа што се тој се наоѓа во потенцијалната инка на активниот заземјувач.

Постојат и други комбинации. На пример комбинацијата кога првиот заземјувач е активен, а вториот пасивен, но поврзан галвански на соседен заземјувачки систем со еквивалентна импеданција Z_{ek} , па за него ќе важи релацијата 4.1

$$U_p = Z_{ek} \cdot I_p. \quad (4.1)$$

Затоа ние ќе посматраме општ случај кога за вториот, пасивен, заземјувач, помеѓу неговиот напон U_p и неговата вкупна струја на одведување во земјата I_p постои релацијата 4.1.

Исто така ќе го посматраме случајот кога за првиот заземјувач е позната струјата I_a што се одведува во земјата, бидејќи подоцна ќе видиме дека секогаш, без оглед на присуството на други(и) заземјувач(и) во неговата околина, помеѓу напонот U_a и струјата I_a кај него ќе постои линеарна релација и едната величина може секогаш да се изрази преку другата.

Во наредниот дел ќе го изложиме општиот математички модел кој се применува при анализата на спрегнатите заземјувачи. Моделот е општ и важи за заземјувачи со произволни димензии, произволна геометрија

и произволна структура, независно од тоа дали се тие составени од линиски спроводници или пак од елементи кои имаат посложени форми.

4.2 Два заемно спрегнати заземјувача (активен и пасивен)

Посматраме два галвански одвоени заземјувача А и Р со произволен облик кои се составени од n_a и n_p елементи, соодветно. За секој од нив ќе важат Максвеловите равенки од типот (3.4), кои напишани во матрична форма гласат

$$\begin{bmatrix} U_a \\ U_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{aa} & r_{ap} \\ r_{pa} & r_{pp} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_a \\ I_p \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

Во релацијата (4.2) се воведени следните обележувања

U_a, U_p Матрици колони на напоните на електродите од заземјувачите, со димензии $n_a \times 1$ и $n_p \times 1$, соодветно,

I_a, I_p Матрици колони на струите на одведување од електродите на првиот односно вториот заземјувач, со исти димензии како напоните, соодветно,

r_{aa}, r_{pp} Квадратни симетрични матрици со димензии $n_a \times n_a$, $n_p \times n_p$, соодветно. По главните дијагонали се сопствените отпорности на електродите, а останатите членови се меѓусебни отпорности на електродите од заземјувачот А и електродите од заземјувачот Р,

$r_{ap} = r_{pa}^T$ Правоаголни матрици со димензии $n_a \times n_p$, односно $n_p \times n_a$, чии членови се меѓусебни отпорности на елементите од заземјувачот А со оние од заземјувачот Р.

Притоа, при пресметката на сопствените и меѓусебните отпорности, се земаат предвид и нивните ликови во однос на рамнините на дисконтинуитетот (површината на земјата и границата меѓу двата слоја), еден лик или повеќе, во зависност од тоа дали тлото е хомогено или пак претставува двослој. Покрај тоа, како и досега, при пресметката можат да се занемарат падовите на напон во самите електроди бидејќи тие се со мала должина и со тоа сите елементи од заземјувачот се на ист потенцијал, односно важи

$$\begin{aligned} U_a &= E_a \cdot U_a, \\ U_p &= E_p \cdot U_p, \end{aligned} \quad (4.3)$$

каде што U_a и U_p се напоните на првиот односно вториот заземјувач, додека со E_a и E_p се означени матрици колони со n_a односно n_p редници, соодветно, при што сите нивни елементи се еднакви на единица.

Параметрите на двата блиски, но галвански одвоени, заземјувача и нивното меѓусебно влијание се проучуваат во услови кога некој од нив е активен. Нека биде тоа заземјувачот А и нека со $I_{Z1} = I_a$ ја означиме струјата што се одведува од првиот заземјувач во земјата. Вториот заземјувач нека е, во општ случај, приклучен на некаков заземјувачки систем со еквивалентна импеданција $Z_{ek} = 1/Y_{ek}$ (при што се можни и граничните случаи кога е $Z_{ek} = 0$ или, пак, $Z_{ek} = \infty$). Првиот услов ($I_{Z1} = I_a$) воведува една дополнителна равенка, а вториот услов уште една. На тој начин за да го решиме проблемот ќе биде потребно системот (4.2) да го дополниме со тие две дополнителни равенки. При тоа врз основа на (3.7) можеме да ја напишеме релацијата (4.4), додека врз основа на (4.1) ќе ја напишеме релацијата (4.5).

$$I_a = (\mathbf{E}_a)^T \cdot \mathbf{I}_a \quad (4.4)$$

$$\begin{aligned} U_p &= -Z_{ek} \cdot I_p = -I_p/Y_{ek}, \\ Y_{ek} \cdot U_p + I_p &= 0, \\ Y_{ek} \cdot U_p + (\mathbf{E}_p)^T \cdot \mathbf{I}_p &= 0. \end{aligned} \quad (4.5)$$

На тој начин добивме линеарен систем од $n_a + n_p + 2$ равенки со ист толкав број непознати. Непознати се струите на одведување \mathbf{I}_a и \mathbf{I}_p од првиот односно вториот заземјувач и двата напона на заземјувачите U_a и U_p .

Од равенките (4.2) и (4.3) произлегува

$$\begin{bmatrix} \mathbf{E}_a \cdot U_a \\ \mathbf{E}_p \cdot U_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{aa} & r_{ap} \\ r_{pa} & r_{pp} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{I}_a \\ \mathbf{I}_p \end{bmatrix} \quad (4.6)$$

или

$$\begin{bmatrix} \mathbf{E}_a \cdot U_a \\ \mathbf{E}_p \cdot U_p \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} r_{aa} & r_{ap} \\ r_{pa} & r_{pp} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{I}_a \\ \mathbf{I}_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{N}_a \\ \mathbf{N}_p \end{bmatrix} \quad (4.7)$$

Во (4.7) со \mathbf{N}_a и \mathbf{N}_p се означени матрици колони со n_a и n_p елементи, соодветно, при што сите нивни елементи се еднакви на нула.

Ако на равенките (4.7) им ги додадеме и дополнителните равенки (4.4) и (4.5) ќе го добиеме следниот систем равенки, напишан во матрична форма

$$\begin{bmatrix} r_{aa} & r_{ap} & -\mathbf{E}_a & \mathbf{N}_a \\ r_{pa} & r_{pp} & \mathbf{N}_p & -\mathbf{E}_p \\ (\mathbf{E}_a)^T & (\mathbf{N}_p)^T & 0 & 0 \\ (\mathbf{N}_a)^T & (\mathbf{E}_p)^T & 0 & Y_{ek} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{I}_a \\ \mathbf{I}_p \\ U_a \\ U_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{N}_a \\ \mathbf{N}_p \\ I_a \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4.8)$$

или

$$B \cdot \begin{bmatrix} I_a \\ I_p \\ U_a \\ U_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} N_a \\ N_p \\ I_a \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (4.9)$$

каде што е

$$B = \begin{bmatrix} r_{aa} & r_{ap} & -E_a & N_a \\ r_{pa} & r_{pp} & N_p & -E_p \\ (E_a)^T & (N_p)^T & 0 & 0 \\ (N_a)^T & (E_p)^T & 0 & Y_{ek} \end{bmatrix}. \quad (4.10)$$

Матрицата B , напишана во поразбирлива форма е прикажана на сликата 4.2.

$\xleftrightarrow{\hspace{10em} n_a + n_p + 2 \hspace{10em}}$											
$\xleftrightarrow{\hspace{4em} n_a \hspace{4em}}$				$\xleftrightarrow{\hspace{4em} n_p \hspace{4em}}$				$\xleftrightarrow{\hspace{1em} 1 \hspace{1em}}$	$\xleftrightarrow{\hspace{1em} 1 \hspace{1em}}$		
r_{11}	r_{12}	\cdots	r_{1,n_a}	r_{1,n_a+1}	\cdots	r_{1,n_a+n_p}	-1	0			
r_{21}	r_{22}	\cdots	r_{2,n_a}	r_{2,n_a+1}	\cdots	r_{2,n_a+n_p}	-1	0			
\vdots	\vdots	\ddots	\vdots	\vdots	\ddots	\vdots	\vdots	\vdots			
$r_{n_a,1}$	$r_{n_a,2}$	\cdots	r_{n_a,n_a}	r_{n_a,n_a+1}	\cdots	r_{n_a,n_a+n_p}	-1	0			
$r_{n_a+1,1}$	$r_{n_a+1,2}$	\cdots	r_{n_a+1,n_a+1}	r_{n_a+1,n_a+1}	\cdots	r_{n_a+1,n_a+n_p}	0	-1			
\vdots	\vdots	\ddots	\vdots	\vdots	\ddots	\vdots	\vdots	\vdots			
$r_{n_a+n_p,1}$	$r_{n_a+n_p,2}$	\cdots	$r_{n_a+n_p,n_a+1}$	$r_{n_a+n_p,n_a+1}$	\cdots	$r_{n_a+n_p,n_a+n_p}$	0	-1			
1	1	\cdots	1	0	\cdots	0	0	0			
0	0	\cdots	0	1	\cdots	1	0	Y_{ek}			

Слика 4.2. Скица на структурата на матрицата B

Решението на матричниот систем равенки (4.9) гласи

$$\begin{bmatrix} I_a \\ I_p \\ U_a \\ U_p \end{bmatrix} = C \cdot \begin{bmatrix} N_a \\ N_p \\ I_a \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (4.11)$$

каде што $C = B^{-1}$ е инверзна матрица на квадратната матрица на системот равенки (4.9) со димензии $(n_a + n_p + 2) \times (n_a + n_p + 2)$.

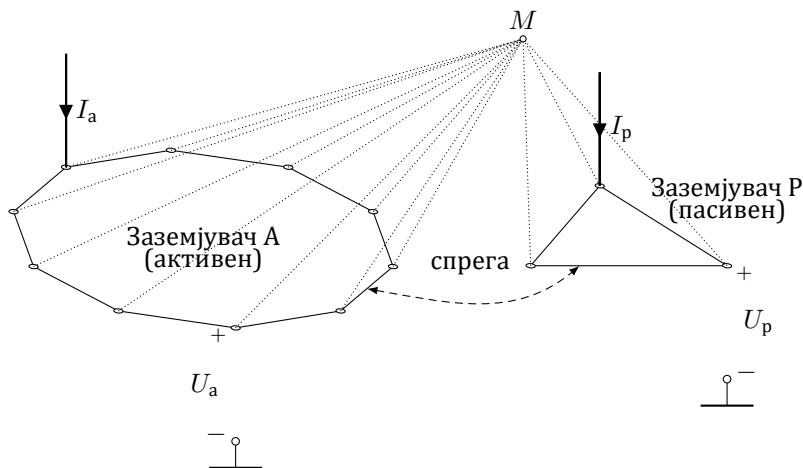
На десната страна во (4.11) сите елементи се нули освен претпоследниот, со индекс $m = n_a + n_p + 1$, еднаков на струјата на одведување I_a од заземјувачот А. Според тоа за непознатите струи и напони ќе добиеме

$$\begin{aligned} I_{a,k} &= C_{km} \cdot I_a, & k = 1, 2, \dots, n_a; \\ I_{p,k} &= C_{km} \cdot I_a, & k = n_a + 1, n_a + 2, \dots, n_a + n_p; \\ U_a &= C_{mm} \cdot I_a; \\ U_p &= C_{m+1,m} \cdot I_a. \end{aligned} \tag{4.12}$$

Во (4.12) со I_k е означена вредноста на струјата што се одведува од елементот k . Притоа првите n_a елементи ($k = 1, 2, \dots, n_a$) му припаѓаат на првиот заземјувач А, додека следните n_p елементи ($k = n_a + 1, n_a + 2, \dots, n_a + n_p$) на вториот заземјувач Р.

За сопствената отпорност на распространување на првиот заземјувач R_{aa} при уважување на постоењето на вториот заземјувач, и за меѓусебната отпорност $R_{ap} = R_{pa}$ на двата заземјувача важи

$$\begin{aligned} R_{aa} &= \frac{U_a}{I_a} = C_{mm}, \\ R_{ap} &= \frac{U_p}{I_a} = C_{m+1,m}. \end{aligned} \tag{4.13}$$



Слика 4.3. Пресметка на потенцијал во точка создаден од спрегнатите заземјувачи А и Р

Потенцијалот φ_M во точка M на површината на земјата е сума на потенцијалите од струите на одведување на двата заземјувача и се пресметува со помош на (4.14). Во неа фигурираат матриците колони r_{aM} и r_{pM} на меѓусебните отпорности на сите електроди од двата заземјувача и нивните ликови и точката M

$$\varphi_M = (r_{aM})^T \cdot I_a + (r_{pM})^T \cdot I_p. \quad (4.14)$$

4.3 Специјални случаи

4.3.1 Пасивниот заземјувач е на нулти потенцијал

Ако пасивниот заземјувач P е на некаков начин (на пример преку неутрален спроводник, преку металниот спроводент плашт на кабел и слично) галвански поврзан со друг заземјувач т.е. заземјувачки систем (водоводна или канализациона градска мрежа), со многу мала еквивалентна импеданција на распростирање, може да се смета дека при одведување на струја од заземјувачот A потенцијалот на заземјувачот P ќе биде занемарливо мал, практично еднаков на потенцијалот на земјата во точките многу оддалечени од заземјувачот A независно од вредноста на струјата I_a

$$U_p = 0, \quad U_p = E_p \cdot U_p = 0. \quad (4.15)$$

Резултатите за останатите непознати U_a , I_a и I_p се добиваат повторно со помош на општите изрази (4.13) само што во матрицата B , дефинирана со (4.10) во последниот дијагонал член, со оглед дека $Z_{ek} = 0$, се става многу голема вредност, на пример $Y_{ek} = 10^6$.

4.3.2 Пасивниот заземјувач е изолиран

Кога пасивниот заземјувач е изолиран тогаш ќе биде

$$I_p = \sum_{k=n_a+1}^{n_a+n_p} I_k = 0. \quad (4.16)$$

Резултатите за останатите непознати U_a , U_{p8} , I_a и I_p се добиваат повторно со помош на општите изрази (4.13) само што во матрицата B , од (4.10) во последниот дијагонал член, со оглед дека $Z_{ek} \rightarrow \infty$, се става вредност $Y_{ek} = 0$.

4.4 Извезен потенцијал на работниот заземјувач кај ТС СН/НН

Поради постоењето на монофазни приемници во НН електроенергетски мрежи, до секој потрошувач на мрежата (индивидуална куќа, станбен објект, индустриски објект и сл.) се водат покрај трите фазни спроводници уште и неутралниот т.е. „нултиот“ спроводник. Во услови на идеална симетрија во мрежата потенцијалот на неутралниот спроводник е еднаков на нула, додека фазните спроводници имаат напони еднакви на фазниот $U_f = U/\sqrt{3}$.

Но најчесто тоа не е така поради постоењето несиметрија во мрежата и присуството на монофазни потрошувачи. Тогаш потенцијалот на неутралниот спроводник веќе не е нула и може да постигне вредност и од неколку десетини волти. Тогаш, велиме, доаѓа до изместување на ѕвездиштето на мрежата од неговата природна положба а трифазниот систем на напони станува несиметричен. Ова изместување е особено големо и опасно при дефекти во НН мрежа (нпр. кога ќе дојде до прекин на нултиот спроводник) и тогаш е можно некои од фазните напони да добијат недозволено високи вредности, блиски до линиските напони.

За да се спречат овие непожелни појави се практикува заземјување на неутралниот спроводник. Тоа заземјување се врши во напојната ТС СН/НН на тој начин што ѕвездиштето од трансформаторот СН/НН (овие трансформатори на НН страна секогаш имаат спрега на намотките ѕвезда или искршена ѕвезда) галвански се поврзува со сопствен заземјувач, наречен погонски или работен заземјувач.

Работниот заземјувач, во основа, има задача да овозможи струјна патека низ земјата за работните струи и на тој начин да ја намалува несиметријата во мрежата предизвикана од несиметријата на товарот. Заземјување на неутралниот спроводник се врши не само во напојната ТС СН/НН туку и во самата мрежа и тоа на поголем број места.

Покрај работниот заземјувач, кај постројките и трансформаторските станици се изведува и т.н. заштитен заземјувач. На него галвански се поврзуваат сите метални делови, куќишта, оклопи и др. на уредите (апаратите) во постројката, зградите во неа и др. Тој има задача да изврши обликување (т.е. давање поволен облик) на потенцијалите на површината од земјата во и околу постројката како и изедначување на потенцијалите на сите метални делови во постројката. Неговата улога е значи, во основа, заштитна и оттаму доаѓа неговото име.

Понекогаш, во услови на недостаток на простор или пак во услови на неможност работниот и заштитниот заземјувач да се изведат така што нивното заемно влијание да биде доволно мало, се изведува еден

единствен заземјувач којшто ја презема улогата и на заштитниот и на работниот заземјувач. Тогаш станува збор за тнр. *здружено заземјување*.

Работниот заземјувач, доколку е веќе изведен засебно, треба да биде под што е можно помало влијание на заштитниот заземјувач на постројката, за да не доаѓа до пренесување на висок потенцијал во НН мрежа кога ќе дојде до грешка (земјоспој) во СН мрежа. Според Техничката препорака [11], која и кај нас многу често се применува и спроведува во практиката, се смета дека работниот заземјувач е доволно изолиран од влијанието на работниот ако при земјоспој во СН мрежа на него се извезува потенцијал кој што не надминува 40% од потенцијалот на заштитниот заземјувач.

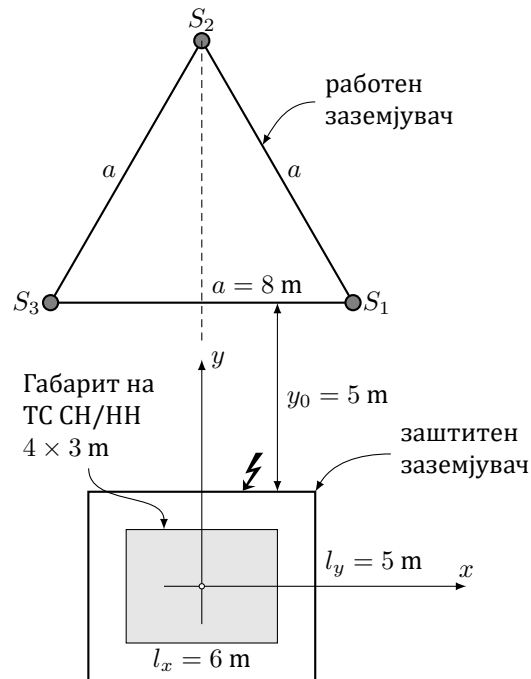
За да се постигне овој услов потребно е тие два заземјувача да бидат доволно оддалечени еден од друг. Обично е доволно заемното растојание помеѓу заземјувачите да биде барем 20 m и во тој случај не е потребна проверка на големината на извезениот потенцијал. Но понекогаш условите на теренот не дозволуваат толкава оддалеченост помеѓу обата заземјувача па заемното влијание ќе биде поголемо. Во таквите случаи е неопходно по пат на мерење или пак по пресметковен пат да се утврди колкав ќе биде изнесениот потенцијал.

Моделот опишан во глава ја овозможува токму оваа проверка по пресметковен пат и истражување на целиот проблем.

Пример 4.1. Да се изврши пресметка на извезениот потенцијал на работниот заземјувач под дејство на струјното поле создадено од струите на одведување од заштитниот заземјувач на една ТС СН/НН. Заштитниот заземјувач претставува правоаголник со димензии $l_x \times l_y = 6 \times 5$ m, закопан на длабочина $h_{ZZ} = 0,8$ m, додека работниот заземјувач е изведен класично, во форма на рамностран триаголник со страница $a = 8$ m, закопан на длабочина $h_{RZ} = 0,8$ m, и три сонди, секоја со должина $l_S = 3$ m и пречник $d_S = 63,5$ mm. Спроводниците на обата заземјувача се изведени од поцинкувани челични ленти FeZn 30×4 , чиј што еквивалентен пречник изнесува $d = 22$ mm. Обата заземјувача се наоѓаат во хомогено тло со специфична отпорност $\rho = 300 \Omega\text{m}$. Растојанието помеѓу нив, дефинирано на сликата П.4.1.1, изнесува $y_0 = 5$ m. Да се смета дека е познат напонот $U_a = 100$ V.

Решение

Решавањето на проблемот ќе го извршиме со помош на програма во Matlab. За таа цел прво ги внесуваме податоците за двата заземјувачи во датотеката `raboten_zastiten.m`. Во неа заземјувачите ги опишуваме со структурата `Z` како и во претходното поглавје. Но, тука наместо една



Слика П.4.1.1. Скица на заземјувачите

матрица $Z.L$ имаме две такви матрици $Z.L1$ и $Z.L2$ за активниот и пасивниот заземјувач, соодветно.

programi/zaz/raboten_zastiten.m

```

1 function Z = raboten_zastiten()
2 Z.Iz = 1;
3 Z.Yek = 0;
4 Z.rho = 300;
5 A = [ 3 2.5 -0.8]; B = [-3 2.5 -0.8];
6 C = [-3 -2.5 -0.8]; D = [ 3 -2.5 -0.8];
7 Z.L1 = [
8     A B 22
9     B C 22
10    C D 22
11    D A 22
12    ];
13 S1=[4 7.5 -0.8]; S3=[-4 7.5 -0.8]; S2=[0 7.5+4*sqrt(3) -0.8];
14 Z.L2 = [
15    S1 S2      22
16    S2 S3      22
17    S3 S1      22
18    S1 S1-[0 0 3] 63.5
19    S2 S2-[0 0 3] 63.5
20    S3 S3-[0 0 3] 63.5
21    ];

```

За полесно внесување на крајните точки на спроводниците од двата заземјувача координатите на карактеристичните точки ги задаваме во векторите A , B , C , D , S_1 , S_2 , S_3 . Со нив, на пример, во матриците $Z.L1$ и $Z.L2$ пишуваме A B 22 што означува спроводник од точката A до точката B со дијаметар од 22 mm или, пак, $S1$ $S1$ - $[0 \ 0 \ 3] \ 63.5$ што означува спроводник со пречник од $63,5$ mm од точката S_1 до точка која е 3 m подлабоко од неа. Решението го добиваме со следната програма.

**Програма 4.1. Решавање на спрегнати заземјувачи
(programi/zaz/resi_raboten_zastiten.m)**

```

1 Z = raboten_zastiten;
2 na = size(Z.L1,1);
3 np = size(Z.L2,1);
4 Z.L = [Z.L1; Z.L2];
5 R = zaz(Z);
6 [Ea,Na,Ep,Np] = ...
7 deal(ones(na,1),zeros(na,1),ones(np,1),zeros(np,1));
8 B = [
9     R      [-Ea; Np] [Na; -Ep]
10    Ea' Np'      0      0
11    Na' Ep'      0      Z.Yek
12    ];
13 rezultat = B^-1 * [Na; Np; 1; 0];
14 rezultat = 100/rezultat(end-1)*rezultat;
15 Ia = rezultat(1:na)
16 Ip = rezultat(na+1:na+np)
17 Ua = rezultat(end-1)
18 Up = rezultat(end)
    
```

Во неа, решението го добиваме во следните 3 чекори

- ① Го определуваме бројот на спроводници во двата заземјувача и формираме зедничка матрица $Z.L$ со која двата заземјувачи ги третираме како еден. Во помош на функцијата zaz ја определуваме матрицата на отпорности R на обединетиот заземјувач.
- ② Ги формираме векторите Ea , Na , Ep , Np и матрицата B според (4.10).
- ③ Претпоставуваме дека струјата I_a изнесува 1 A и ги пресметуваме струите и напоните на заземјувачите според (4.11). Потоа, за да го задоволиме условот $U_a = 100$ V добиените резултати треба да ги помножимо со коефициентот $100/rezultat(end-1)$ затоа што напонот U_a се наоѓа на претпоследна позиција во векторот $rezultat$.

Како резултат од пресметките ги добиваме следните вредности

$$\begin{aligned}
 U_a &= 100 \text{ V}; & U_p &= 19,723 \text{ V} = 19,7\%U_a; \\
 I_a &= 4,034 \text{ A}; & I_p &= 0; \\
 Z_{aa} &= (U_a/I_a)_{I_p=0} = 24,789 \Omega; & Z_{ap} &= (U_p/I_a)_{I_p=0} = 4,889 \Omega.
 \end{aligned}$$

Во случајов е битно да се истакне фактот дека процентот на извезениот потенцијал не зависи од специфичната отпорност на тлото ниту, пак, од големината на напонот U_a односно струјата I_a . Тој зависи исклучиво од геометријата на проблемот, т.е. од димензиите на заземјувачите и од нивниот заемен распоред.

Интересно е да се пресмета колкав ќе биде потенцијалот U_p на работниот заземјувач кога на него е галвански поврзан неутралниот спроводник од НН мрежа чија еквивалентна импеданција има вредност $Z_{ек} = (5 + j0) \Omega$, што приближно би одговарало на случајот кога неутралниот спроводник е заземјен на три столбни места по должината на изводот со заземјувачи чија што отпорност на распростирање во просек изнесува $R_S = 15 \Omega/\text{столбно место}$.

Во тој случај пресметките ги даваат следните резултати.

$$\begin{aligned} U_a &= 100 \text{ V}; & U_p &= 4,373 \text{ V} = 4,37\%U_a; \\ I_a &= 4,207 \text{ A}; & I_p &= 0; \\ Z_{aa} &= (U_a/I_a)_{I_p=0} = 23,773 \Omega; & Z_{ap} &= (U_p/I_a)_{I_p=0} = 1,040 \Omega. \end{aligned}$$

Значи во нормални околности, кога НН мрежа е исправна (без прекинат неутрален спроводник) потенцијалот што би се пренел на неутралниот спроводник преку кондуктивната спрега помеѓу заштитниот и работниот заземјувач ќе биде само 4,37% од потенцијалот на заштитниот заземјувач, што значи дека во тој случај реалната опасност од превисоки извезени потенцијали не постои. Дури при напон на заштитниот заземјувач $U_a = 1150 \text{ V}$, на работниот заземјувач ќе се пренесат дозволените, според прописите, 50 V кои преку неутралниот спроводник ќе се појават кај потрошувачите во НН мрежа.



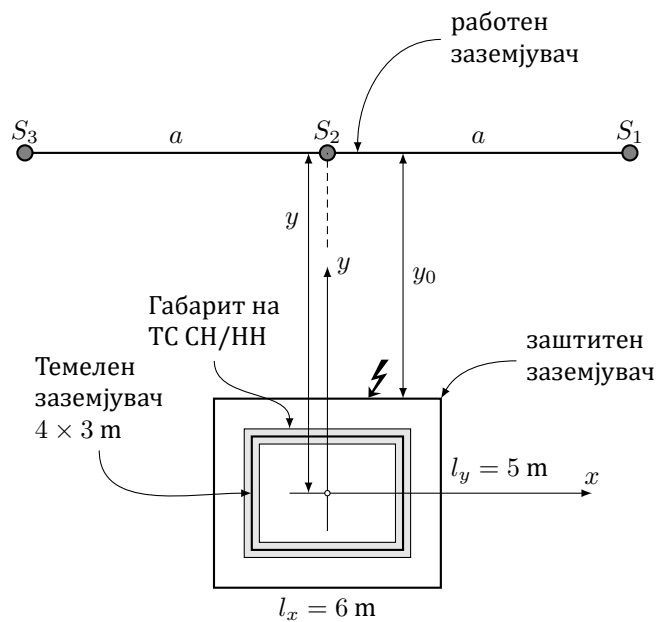
Задача 4.1. Да се изврши параметарска анализа на зависноста на извезениот потенцијал $U_{RZ}(\%)$ на работниот заземјувач во функција од односот $\xi = y/\sqrt{A}$ (видете слика 3.4.1.1). Притоа со y е означено растојанието помеѓу тежиштето на заштитниот заземјувач и средината на работниот заземјувач, додека со A е означена површината опфатена со надворешната контура на заштитниот заземјувач ($A = l_x \cdot l_y$).

Работниот заземјувач се состои од три вертикално закопани челични сонди така што горниот раб од сондите се наоѓа на длабочина $h = 0,8 \text{ m}$. Тие се поставени во права линија, на меѓусебни растојанија $a = 8 \text{ m}$. Секоја сонда има должина $l_S = 3 \text{ m}$ и пречник $d_S = 63,5 \text{ mm}$. Сондите се галвански поврзани со бакарно јаже $\text{Cu}50 \text{ mm}^2$ ($d = 9 \text{ mm}$), закопано на длабочина $h_{RZ} = 0,8 \text{ m}$.

Заштитниот заземјувач се состои од две концентрични правоаголни контури. Првата (внатрешната) е темелен заземјувач со димензии $l_{xt} \times l_{yt} = 4 \times 3 \text{ m}$, закопан на длабочина $h_t = 0,5 \text{ m}$, додека втората контура има димензии $l_x \times l_y = 6 \times 5 \text{ m}$, закопана на длабочина $h_{ZZ} = 1 \text{ m}$.

Обете правоаголни контури на заштитниот заземјувач се изведени со бакарно јаже $\text{Cu}50 \text{ mm}^2$ ($d = 9 \text{ mm}$). Специфичната отпорност на тлото изнесува $\rho = 100 \Omega\text{m}$.

Анализата да се направи со помош на Matlab. Резултатите да се прикажан табеларно и графички. Да се извлечат заклучоци.



Слика 3.4.1.1. Изглед на заземјувачите и нивен заемен распоред



4.5 Анализа на начинот на заземјување на металната ограда на ТС

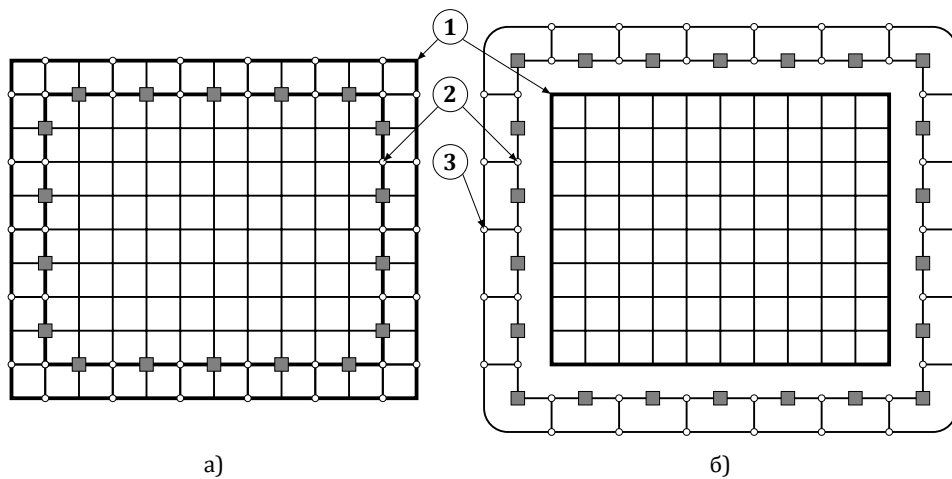
Металната ограда на ТС ВН/СН и ТС СН/СН има задача да го спречи пристапот на надворшните лица да влезат во кругот на постројката односно трансформаторската станица и да бидат изложени на опасностите од електричен удар или предизвикување опасност во самата постројка. Но минувачите сепак можат, и надвор од постројките, кога се наоѓаат од од надворешната страна на оградата, да остварат

физички и галвански контакт со неа и на тој начин, под определени услови, да бидат изложени на опасностите од превисок напон на допир или чекор. Затоа е многу важно да се утврди како да се отстранат овие опасности и како надворешните лица да бидат заштитени од споменатите опасности.

Овој проблем е веќе подолго време предмет на расправи и различно третирање во проектантската практика. Сè уште во светската стручна литература нема единствен став во однос на начинот на заземјувањето на оградата на една постројка односно трафостаница.

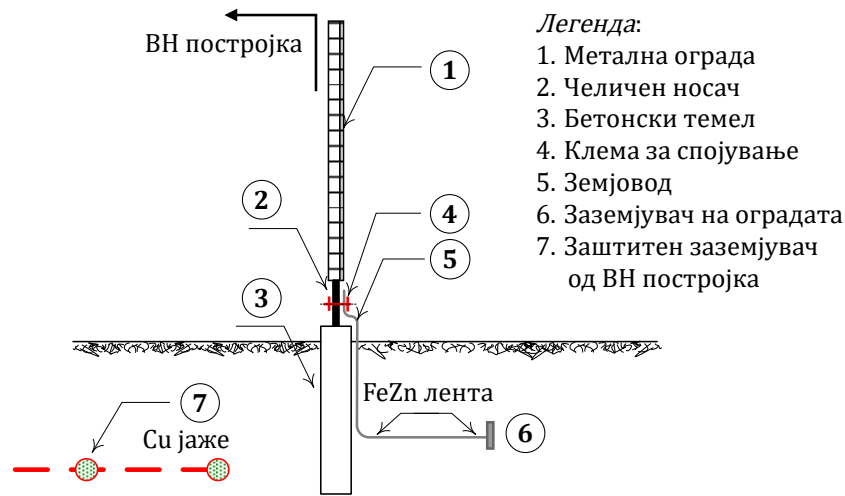
Постојат две можности при изборот на локацијата и димензиите на металната ограда на една постројка

- оградата се наоѓа во внатрешноста на габаритот опфатен со заштитниот заземјувач на постројката (слика 4.4а);
- оградата излегува од габаритот опфатен со заштитниот заземјувач (слика 4.4б).



Слика 4.4. Начини на поставување на металната ограда од една постројка
1) мрежест заземјувач, 2) ограда, 3) заземјувач на оградата

Кога оградата на постројката се наоѓа во внатрешноста на габаритот опфатен со заштитниот заземјувач на постројката тогаш е природно таа да биде галвански поврзана за него. Но кога металната оградата излегува од габаритот на заземјувачот, што е почесто случај во практиката, тогаш таа се заземјува со посебен, сопствен, заземјувач, поставен од надворешната страна на оградата на растојание од околу 1 m и на длабочина од 0,5 до 0,8 m (слика 4.5). Сопствениот заземјувач на оградата може да биде поврзан со заштитниот (главниот) заземјувач, (т.н. “здружено заземјување”), или пак галвански да биде одвоен од него.



Слика 4.5. Начин на заземјување на металната ограда од електроенергетските постројки

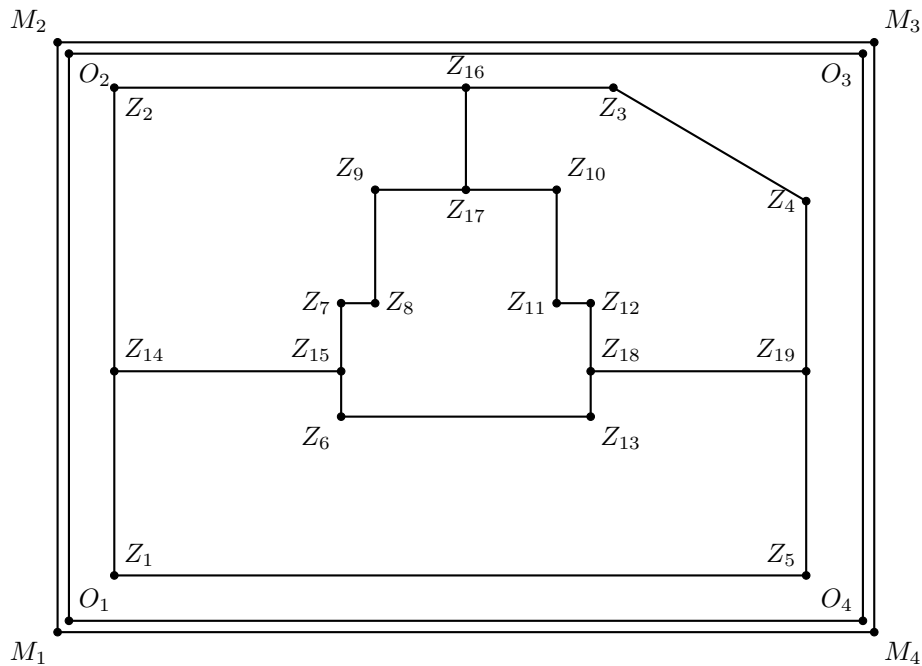
Во првиот случај (слика 4.4а) оградата го има потенцијалот на заштитниот заземлувач на постројката и определувањето на напоните на допир при допир на оградата се сведува на пресметка на потенцијалите по површината од земјата во нејзината непосредна близина.

Вториот случај (слика 4.4б) се сведува на случајот на два галвански одвоени, но кондуктивно спрегнати, заземлувачи. Заштитниот заземлувач на постројката ќе ја има улогата на активниот, додека заземлувачот од металната ограда ќе биде пасивниот заземлувач (сумарната струја на одведување во земјата од него е нула). Бидејќи пасивниот заземлувач се наоѓа во потенцијалната инка на активниот (т.е. заштитниот) заземлувач, при земјоспоеви во постројката заземлувачот на оградата, а со тоа и самата ограда, ќе добијат одреден потенцијал кој, во општ случај, се разликува од потенцијалите по површината од земјата во непосредна близина на металната ограда. Поради тоа лицето кое што ќе ја допре металната ограда, дури и од нејзината надворешна страна, ќе премости извесна потенцијална разлика и може да биде изложено на опасност.

Во некои национални прописи можат да се најдат препораки кои се однесуваат на разгледуваната проблематика. Тие обично во себе го опфаќаат и начинот на заземјување на неутралната точка на мрежата напојувана од посматраната ТС. Според Техничките препораки ТП 7 и ТП 23 [10, 11], кои и кај нас долго време се применувале а и сè уште се применуваат, потребно е поврзување на заземлувачот од ТС со прстенестиот заземлувач на оградата, без разлика дали мрежата е

со изолирана неутрална точка или пак со неутрална точка заземјена преку мал отпор. Заземјувачкиот систем на ТС се димензионира според напоните на допир така што тие не смеат да ги преминат дозволените вредности, дефинирани со истите препораки. Деталите за ова прашање можат да се најдат во споменатата литература и овде тие нема да бидат изложени. Овде само ќе биде илустрирана примената на моделот на спрегнатите заземјувачи, изложен во точката (4.4), за решавањето на овој проблем на еден реален случај од практиката.

Задача 4.2. Со помош на Matlab да се пресмета вредноста на изнесениот потенцијал, во (V) и во (%), што ќе го прими металната ограда од ТС 35/10 kV/kV, чијшто заштитен заземјувач е скициран на сликата 3.4.2.1. Заштитниот заземјувач е изведен од бакарно јаже Cu 50 mm² ($d = 9$ mm), закопано на длабочина $h = 0,8$ m.



Слика 3.4.2.1. Скица на заштитниот заземјувач и заземјувачот на оградата на ТС 35/10 kV Оморане 2 (кумановско)

Металната ограда ($O_1 - O_2 - O_3 - O_4 - O_1$) е поставена надвор од габаритот на заштитниот заземјувач и има форма на правоаголник со димензии 50×70 m. Таа е заземјена со сопствен заземјувач ($M_1 - M_2 - M_3 - M_4 - M_1$) во форма на правоаголник со димензии 52×72 m, изведен од челична поцинкувана лента FeZn 30×4 mm², ($d_{ек} = 22$ mm) закопана на длабочина $h_{мо} = 0,5$ m. Координатите на темињата

од оградата, нејзиниот заземјувач и заштитниот заземјувач се дадени во следната табела.

Табела 3.4.2.1. Точки на заземјувачот во ТС 35/10 kV Оморане 2

координати изразени во метри		
$Z_1 (4, 4)$	$Z_{10} (43, 38)$	$Z_{19} (65, 22)$
$Z_2 (4, 47)$	$Z_{11} (43, 28)$	$O_1 (0, 0)$
$Z_3 (48, 47)$	$Z_{12} (46, 28)$	$O_2 (0, 50)$
$Z_4 (65, 37)$	$Z_{13} (46, 18)$	$O_3 (70, 50)$
$Z_5 (65, 4)$	$Z_{14} (4, 22)$	$O_4 (70, 0)$
$Z_6 (24, 18)$	$Z_{15} (24, 22)$	$M_1 (-1, -1)$
$Z_7 (24, 28)$	$Z_{16} (35, 47)$	$M_2 (-1, 51)$
$Z_8 (27, 28)$	$Z_{17} (35, 38)$	$M_3 (71, 51)$
$Z_9 (27, 38)$	$Z_{18} (46, 22)$	$M_4 (71, -1)$

Специфичната отпорност на тлото во коешто се наоѓа заземјувачот изнесува $\rho = 250 \Omega \text{m}$. Струјата на доземен спој што се инјектира во заштитниот заземјувач при земни споеви во постројката изнесува $I_Z = 20 \text{ A}$.

Одговор

$$\begin{aligned}
 U_a &= 55,3 \text{ V}; & U_p &= 28 \text{ V} = 50,6\%U_a; \\
 I_a &= 20 \text{ A}; & I_p &= 0; \\
 Z_{aa} &= (U_a/I_a)_{I_p=0} = 2,765 \Omega; & Z_{ap} &= (U_p/I_a)_{I_p=0} = 1,4 \Omega.
 \end{aligned}$$

□ □ □

4.6 Извоз на потенцијали во станбените и други видови објекти

При појава на земјоспој во среднонапонската (СН) дистрибутивна мрежа, а уште повеќе при земјоспоеви или еднофазни куси врски во високонапонската (ВН) мрежа, каблите со спроводен надворешен плашт (на пример класичните кабли од типот IPO, коишто масовно се користат во нашите мрежи) што припаѓаат на мрежата зафатена со земјоспојот стануваат извор на опасност. Имено, кога ќе настане земјоспојот, металните плаштови на овие кабли добиваат некаков потенцијал и бидејќи се во добар контакт со тлото, тие во својата околина стануваат извор на струјно поле. Кога во близината на некаков

објект кој што има свој сопствен заземјувач (темелен, контурен или било каков друг вид) минува еден таков кабел, поради постоењето кондуктивна спрега помеѓу металниот плашт на кабелот и заземјувачот на објектот, заземјувачот ќе прими некаков потенцијал. Тој потенцијал ќе се пренесе на сите метални делови во внатрешноста на објектот бидејќи, по правило, сите метални делови во објектите „се заземјуваат“, т.е. галвански се поврзуваат со заземјувачот на објектот. На тој начин во објектот ќе се внесе еднакво опасноста преку кондуктивната спрега на заземјувачите.

Доколку во објектот е во целост извршена мерката за безопасност наречена „изедначување на потенцијалите“, тогаш реална опасност не постои, без оглед на тоа колкав потенцијал ќе прими заземјувачот на објектот. Но кога изедначувањето на потенцијалите во објектот не е целосно извршено (што кај нас претставува прилично честа појава, особено во постарите станбени објекти) тогаш помеѓу заземјените делови на објектот, коишто го примиле извезениот потенцијал и незаземјените делови (коишто обично имаат потенцијал на референтната земја, т.е. нулти потенцијал) ќе се јави потенцијална разлика која што може да биде опасна.

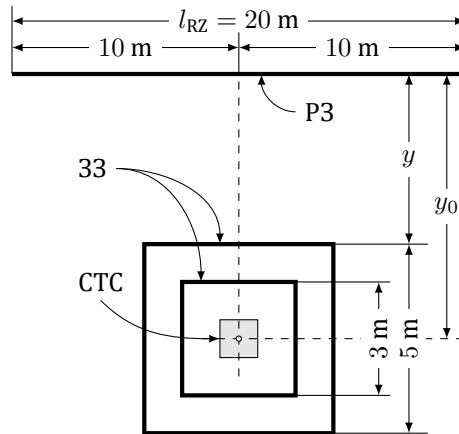
Мерката наречена „изедначување на потенцијалите“ всушност претставува галванско поврзување на сите метални делови и инсталации (водоводни, пароводни, канализациони и сите други видови метални цевки, челична арматура на градежната конструкција на објектот и др.). Така заемно поврзани тие се „заземјуваат“ т.е. галвански се поврзуваат со заземјувачот на објектот.

Бидејќи објектот може да биде станбена зграда, индивидуална куќа, работилница, училиште, јавна установа и слично, значи објект во којшто престојуваат луѓе, под наведените околности извозот на потенцијал на неговиот заземјувач може да предизвика појава на превисок напон на допир и можност за човечки жртви, пожар и други видови несреќи. Затоа од интерес е да се оцени колкави се извезените потенцијали што можат да се јават во таквите ситуации. Овој проблем повторно може да се реши со помош на моделот на спрегнати заземјувачи, опишан во оваа глава.

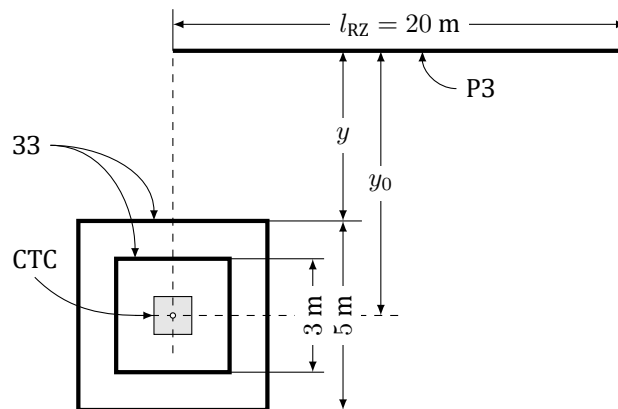
Задача 4.3. Заштитниот заземјувач (ЗЗ) на една столбна трансформаторска станица (СТС) 10/0,4 kV/kV; 250 kVA, е формиран со помош на две квадратни контури, изведени од поцинкувана челична лента FeZn 30 × 4 ($d = 22$ mm). Првиот квадрат има страница $a_1 = 3$ m и е закопан на длабочина $h_1 = 0,5$ m, додека вториот е со димензија $a_2 = 5$ m и е закопана на длабочина $h_2 = 1$ m (слика 3.4.3.1).

Работниот заземјувач (РЗ) од СТС е изведен, исто така, од поцинкувана челична лента FeZn 30 × 4 ($d = 22$ mm) со должина

$l_{RZ} = 20$ m, закопана на длабочина $h_{RZ} = 0,8$ m. Обата заземјувача се поставени во хомогено тло со спец. отпорност $\rho = 300 \Omega\text{m}$.



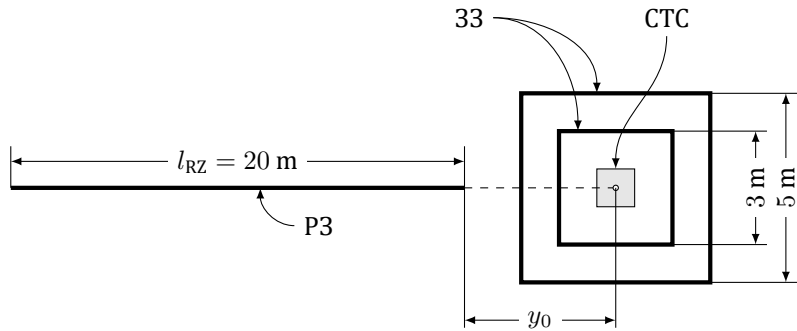
Слика 3.4.3.1. Изнесување на потенцијалот од заштитен на работен заземјувач (распоред 1)



Слика 3.4.3.2. Изнесување на потенцијалот од заштитен на работен заземјувач (распоред 2)

Струјата што се одведува во земјата од заштитниот заземјувач во услови на земјоспој изнесува $I_Z = 40$ A.

Со помош на програма во Matlab да се определи зависноста $U_{RZ}(y_0)$ на големината извезениот потенцијал во (V) и во (%) од ЗЗ на РЗ од растојанието y_0 за вредности од множеството: 5, 10, 15, 20 и 25 m. Од таа зависност да се процени колкаво треба да биде растојанието $y_{40\%}$ ако сакаме во случајов извезениот потенцијал да не ја надмине вредноста 40%.

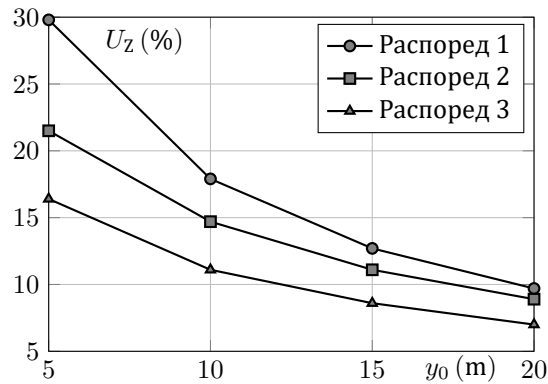


Слика 3.4.3.3. Изнесување на потенцијалот од заштитен на работен заземјувач (распоред 3)

Табела 3.4.3.1. Резултати од пресметките на разгледуваните конфигурации заземјувачи

Распоред	Потенцијал	y_0 (m)				$y_{40\%}$ (m)
		5	10	15	20	
1	U_{RZ} (V)					
	U_{RZ} (%)					
2	U_{RZ} (V)					
	U_{RZ} (%)					
3	U_{RZ} (V)					
	U_{RZ} (%)					

Резултатите од пресметките да се сместат во табелата 3.4.3.1. Анализите да се повторат и за случаите кога позицијата на PЗ во однос на 33 е како на сликите 3.4.3.2 и 3.4.3.3. Кои се заклучоците во врска со заемниот распоред помеѓу работниот и заштитниот заземјувач?



Слика 3.4.3.4. Решение на задачата

□ □ □

Задача 4.4. Отпорноста на распростирање на заштитниот заземјувач од столбната трансформаторска станица (СТС) од задачата 4.3, пресметана со програма во Matlab изнесува $R_z = \text{---} \Omega$. Да се пресмета колкава ќе биде таа после поставувањето на челична водоводна цевка со неограничена должина и со надворешен пречник $d_2 = 25,4 \text{ mm}$, на длабочина $h = 0,8 \text{ m}$ и на растојание $\delta = 0,5 \text{ m}$ од работ на надворешниот прстен на заземјувачот.

Напатствие. Проблемот да се реши со помош на програма слична на користената во примерот 4.1. Притоа челичната цевка може да се моделира како пасивен заземјувач составен од два хоризонтални елемента, секој со должина од по 500 m, поставени центрирано во однос на самата столбна ТС, слично како работниот заземјувач во задачата 4.3 – распоред 1.

□ □ □

5

ТИПСКИ ЗАЗЕМЈУВАЧИ НА НАДЗЕМНИТЕ ВОДОВИ И НИВНИ КАРАКТЕРИСТИКИ

5.1 Општо за заземјувањето на надземните водови

Заземјувачот на столбот од еден надземен вод се состои од множество неизолирани и меѓусебно галвански споени метални елементи (хоризонтални и вертикални електроди), коишто се закопани во земјата така што со неа остваруваат добар електричен контакт. Како елементи од заземјувачот на столбот, секако, се вбројуваат и самите армирано-бетонски темели на столбовите од далекуводите, коишто претставуваат „природни заземјувачи“ на столбот. Во услови на тло со добра електрична спроводност ($\rho \leq 300 \Omega\text{m}$) самите темели на столбот се често пати доволни да ја извршат функцијата на заземјување на столбот.

Заземјувачот на еден столб има две основни задачи

- успешно да ја одведе струјата на молњата во земјата кога ќе дојде до директно атмосферско празнење во надземниот вод, без да дојде до појава на повратен прескок и
- во случајот на доземен спој (еднофазна куса врска), настанат на водот, тој има задача струјата на земјоспој, која уште се нарекува и „струја на грешка“ да ја спроведе во земјата, така што на површината од земјата да не се појават потенцијали што ќе го загрозат животот на луѓето и животните коишто можат да се најдат во непосредна околина на самиот столб.

Споменатите две барања ги дефинираат и рамковните задачи на заземјувачите на столбовите од надземните водови и тие треба да бидат исполнети во што е можно поголема мера.

Од обете причини заземјувачот треба да има што е можно помала преодна отпорност према земјата која, како што беше претходно кажано,

се нарекува уште и "отпорност на распростирање" на заземјувачот. Покрај смалувањето на ризикот од повратен прескок и опасностите од појава на опасни напони на допир и чекор, тука треба да се спомене потребата од остварување ниска преодна отпорност за потребите на самата релејна заштита на водот (ако е таа предвидена) бидејќи со ниската преодна отпорност треба да обезбеди струјата на грешка да задржи доволно висока вредност заради правилното дејствување на релејната заштита.

Основни карактеристики на секој заземјувач се

- отпорноста на распростирање R_Z за наизменична струја;
- максималната потенцијална разлика на допир $E_{d,max}$;
- максималната потенцијална разлика на чекор $E_{c,max}$;
- импулсната отпорност на распростирање R_i за импулсни струи, каква што е струјата на молњата.

Овие карактеристики зависат од димензиите и геометријата на заземјувачот, но и од карактеристиките на почвата (нејзината структура, специфична отпорност ρ и друго).

Основна задача на проектирањето (димензионирањето) на заземјувачите на столбовите е при однапред позната струја на одведување во земјата I_Z (т.е. зададена веројатност за повратен прескок P_0) и позната специфична отпорност на тлото ρ , да се избере заземјувач со облик и димензии такви што тој ќе ги задоволи техничките ограничувања дефинирани со мерките за безопасност, а во исто време ќе биде и економичен. Од тука произлегува заклучокот дека изборот и димензионирањето на заземјувачите, во општ случај, е сложена техничко-економска задача, чиешто решение треба да претставува оптимален компромис помеѓу техничките барања наметнати со прописите, потребите за сигурност и барањата за економичност.

Под терминот решавање на заземјувач се подразбира определување на отпорноста на распростирање R_Z т.е. одредување на потенцијалот U_Z на кој доаѓа заземјувачот и заземјените метални делови, како и определување на распределбата на потенцијалите по површината на земјата во негова близина, а во тој контекст и одредување на потенцијалните разлики E_d и E_c .

За решавање на овој проблем денес постојат такви математички модели и постапки кои овозможуваат по пресметковен пат да се добијат резултати со многу висока точност. Тие базираат на примената на теоријата на поле и решавањето на Максвеловите равенки, како што беше изложено во првата глава, користејќи ја притоа формалната аналогија што постои помеѓу математичките релации со кои се опишува електричното и стационарното струјно поле. Врз основа на тие модели е изготвена компјутерска програма за решавање на заземјувачите

на столбовите од надземните водови. Сите натамошни пресметки на заземјувачите на столбовите ќе бидат вршени со помош на оваа компјутерска програма.

5.1.1 Осврт кон прописите за заземјување на столбовите. Технички препораки. Постојна практика

Техничките прописи и препораки се, во принцип, договорни правила на однесување, теориски докажани и практично проверени. Тие од една страна водат сметка за техничката сигурност на погонот, условите за безбедност и слично, а од друга страна водат сметка и за економичноста и рационалноста на применетото техничко решение. Затоа во низа случаи, а тоа е особено присутно овде, кога зборуваме за заземјувачкиот систем (ЗС) на еден надземен вод, тие му оставаат на проектантот можност за широк избор. Изборот треба да се темели на проверената традиција, инженерското искуство и на интуицијата. Но притоа, безусловно, треба да бидат задоволени и извесни технички норми со кои се обезбедува определена сигурност во погонот. Прописите, значи, дозволуваат и дополнителни зафати со кои се зголемува сигурноста на водот, а тие зафати треба да се спроведуваат ако е тоа потребно и оправдано. Одредбите од прописите се, според тоа, насоки во согласност со кои се врши изборот и димензионирањето на заземјувачите.

Правилник за техничките нормативи за изградба на надземни електроенергетски водови

Со постојниот „Правилник за техничките нормативи за изградба на надземни електроенергетски водови со номинален напон од 1 kV до 400 kV“ (Сл. лист на СФРЈ бр. 65/1988) ([13]) се определени, но недоволно прецизно, начините на изведување на заземјувачките системи (ЗС) на надземните водови. Досегашниот традиционален начин за избор на ЗС се темелеше единствено на интуицијата и инженерското искуство на проектантот и притоа отсутствуваше нормирањето на ризикот за испад на надземниот вод под дејство на атмосферските празнења. Исто така не се водеше сметка за вредноста на специфичната отпорност на тлото по должината на трасата од надземниот вод, а наедно со тоа отсутствуваше и било каква оптимизација на цената на чинењето на ЗС.

Услови за избор на заземјувачкиот систем на НВ со оглед на земните споеви

При изборот на заземјувачите со оглед на струјата на земен спој, односно еднофазна куса врска, задача на изборот е да се постигнат услови за безбедност во поглед на можностите за појава на опасни

напони на допир и чекор во непосредната околина на столбот при појава на земен спој/куса врска. Според членот 77 од Правилникот [13], надземните водови што и припаѓаат на мрежа со ефикасно заземјена неутрална точка (а тоа се кај нас сите високонапонски водови $U_n \geq 110 \text{ kV}$, па според тоа и разгледуваниот) мораат да имаат уреди за брзо автоматско исклучување при земјоспој, кои сигурно ја исклучуваат делницата во дефект и така ја отстрануваат опасноста од дејството на напонот на местото на земјоспојот. Во тој случај, според членот 78, околу секоја стопа од расчленетиот темел на столбот ќе биде потребно да се постави по еден или два прстена со најмала длабочина на вкопување од 0,5 m. Доколку се предвидува поставување и на уште еден дополнителен прстен (контура) околу сите 4 стопи на темелот, тогаш според овој член, неговата големина и позиција во однос на стопите од темелот треба да биде таква што ќе се постигне поволно обликување на потенцијалот.

Според чл. 80 од Правилникот [13], во поглед на заштитата од опасен напон на местото на земјоспојот, доколку е водот снабден со уреди за брзо автоматско исклучување на земјоспојот, тогаш отпаѓа потребата да се преземаат други посебни мерки, освен претходно споменатите. Значи, напоните на чекор и допир ниту во еден случај не се поставуваат како критериум за избор и димензионирање на ЗС на водот, т.е. самата мерка на брзо автоматско исклучување на земниот спој и обликувањето на потенцијалот околу столбот со помош на прстените се сметаат за доволни мерки на сигурност со кои се елиминира опасноста од овој вид.

Кога надземниот вод не е снабден со уреди за брзо автоматско исклучување на земјоспојот како и во мрежи со незаземјена (изолирана) неутрална точка или неутрална точка заземјена преку придушница, каде што траењето на земјоспојот може да биде и подолго, отпорноста на распростирање R_Z на заземјувачите кај столбови на обработливи површини, покрај прометни патишта и во населени места, според Правилникот [13], не смее да биде поголем од

$$R_Z \leq \frac{U_Z}{I_Z}, \quad (5.1)$$

каде што е $U_Z = 125 \text{ V}$ најголем дозволен напон на столбот, додека I_Z е струја што се одведува во земјата на местото на земјоспојот.

Се покажува дека во многу ситуации што се среќаваат на теренот овој услов е премногу тешко да да биде исполнет. Условот (5.1) е рецидив од минатото кога се немало доволно сознанија за природата на електротрауматизмот и за реалните опасности сврзани со него и веројатно е во сила уште само во Република Македонија. Тој не претставува реален одраз на опасностите од превисоките напони на допир и чекор и не води кон рационален избор и димензионирање

на заземјувачите од столбовите на надземните водови. Затоа е неопходно да се изврши негова ревизија и преиспитување после кое тој најверојатно ќе биде заменет со нов, значително полиберален и порационален критериум.

Услови за избор на заземјувачкиот систем на НВ со оглед на атмосферските празнења

При удар на гром во столбот или во заштитното јаже, се јавува опасност од појава на повратен прескок¹. За да се сведе оваа опасност на прифатлива мерка, неопходно е, според Правилникот [13], зависно од степенот на изолацијата на водот, да се одреди максимално дозволената отпорност на заземјување. При ова треба да се земаат предвид и зачестеноста на атмосферските празнења и јачината на струјата на громовите, доверливоста во работењето на водот што треба да се постигне, како и трошоците за изведување на заземјувањето.

Значи, основна задача на заземјувачите на столбовите според овој критериум е да се спречи или да се намали веројатноста за појава на повратен прескок на изолацијата при удар на гром во столбот или во заштитното јаже. Притоа, степенот на постигнатата сигурност, т.е. нивото на доверливо работење на водот со оглед на атмосферските пренапони треба да биде компромис помеѓу потребите од сигурност во погонот и цената на чинење на водот. Тој во голема мера зависи од степенот на загрозеност на водот од атмосферските пренапони, од една, и од неговата важност во електроенергетскиот систем, од друга страна.

Правилникот [13] во оваа смисла значително го упростува проблемот и од тие причини може да се смета дека денес е тој на извесен начин надминат. Имено, според членот 83, се смета дека повратен прескок не е веројатен ако за големината на отпорноста на распространување на заземјувањето е исполнет следниот услов

$$R_Z \leq \frac{U_{\text{подн}}}{I_M}, \quad (5.2)$$

каде што е

R_Z отпорност на заземјувањето на посматраниот столб, без врска со заштитните јажиња (во текстот на Правилникот означен со R_{uz});

¹Повратен пресекок (backflash) е појава што се јавува при директните атмосферски празнења во столб или во заштитно јаже во близина на столбот од надземниот вод. Кога импулсната струја на громот I_Z е голема или, пак, кога струјата I_Z има вообичаена големина но импулсната отпорност на столбот R_Z е голема, под дејство на атмосферското празнење во столбот доаѓа до подигање на неговиот потенцијал на вредност која што ја надминува импулсната цврстина на неговата изолација (тнар. „поднослив напон“ $U_{\text{подн}}$). Тогаш доаѓа до електричен прескок на изолаторот – појава наречена „повратен прескок“.

$U_{\text{подн}}$ поднослив ударен напон на изолацијата на посматраниот столб, во суво (во текстот на Правилникот означен со U_i);

I_M темена вредност (амплитуда) на ударната струја на громот за посматраниот столб (во текстот на Правилникот означен со I_u).

При изборот на пресметковната темена вредност на струјата I_M , според Правилникот [13], како ориентација можат да послужат вредностите дадени во табелата 5.1, кои покажуваат со колкава веројатност (изразена во проценти), амплитудата на струјата на громот нема да ја надмине вредноста, наведена во првата редица на оваа табела.

Табела 5.1. Распределба на амплитудите на струјата на громот, според Правилникот [13]

Ударна струја I_M (кА)	5	10	15	20	30	40	50	60
Веројатност $P(I_M)$ (%)	14	40	62	79	91	95	98	99

Основа за усвојување на темената вредност на ударната струја I_M со која ќе се врши димензионирањето на заземјувачите, според Правилникот [13], се податоците со кои се располага за зачестеноста на атмосферски празнења и бројот на деновите со грмежи T_d во годината или, пак, густината N_g , т.е. годишниот број на удари на гром на 1 km^2 .

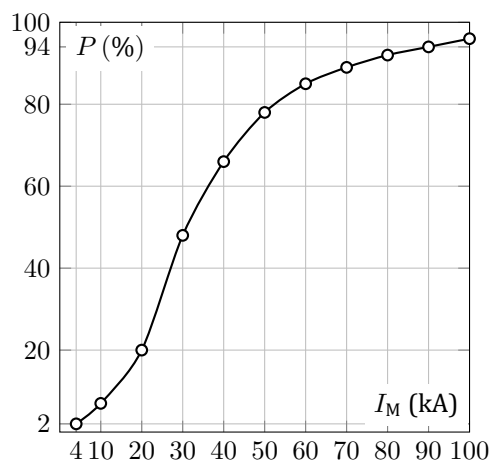
Така, на пример, од оваа табела следува дека со 95% сигурност можеме да очекуваме дека амплитудата на струјата на громот нема да ја надмине вредноста од $I_M = 40 \text{ kA}$. Ако земеме дека подносливиот ударен напон на основната изолација на еден надземен вод изнесува $U_{\text{подн}} = 496 \text{ kV}$, (што е вообичаено за основната изолација на повеќето 110 kV водови во Р. Македонија), тогаш, од релацијата (5.1) следува дека доколку вредноста на отпорноста на распростирање на заземјувачот изнесува $R_Z = U_{\text{подн}}/I_M = 496/40 = 12,4 \Omega$, тогаш со ризик од само 5% можеме да очекуваме дека при удар на гром во столбот нема да дојде до повратен прескок, т.е. можноста за повратен прескок во тој случај е практично елиминирана.

Од увидот во посовремената стручна светска литература може да се констатира дека табелата 5.1, која според нашиот Правилник е основа за димензионирање на заземјувачите на столбовите од надземните водови, е базирана на многу стари сознанија за големината на струјата на громот. Таа дава значително пониски вредности за струјата на громот отколку што денес се смета за реално, и дава премногу „оптимистичка“ слика за разгледуваниот проблем. Затоа е препорачливо за таа цел да се користат табели со други, посовремени, податоци каков што е, на

пример општоприфатениот дијаграм од сликата 5.1, односно табелата 5.2.

Табела 5.2. Функција на распределба на струјата на громот според распределбата на CIGRE

Струја I_M (kA)	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Веројатност (%)	7	20	48	66	78	85	89	92	94	96



Слика 5.1. Кумулативна веројатност на распределба на струјата на молњата со негативен поларитет (распределба на CIGRE)

Според најновите сознанија кумулативната веројатност ², како што обично се нарекува резултантната распределба на амплитудата на струјата на молњата на првиот надолен удар со негативен поларитет (80 – 90% од сите надолни удари се негативни), е прикажана на сликата 5.1. На апсцисната оска од оваа слика е нанесена големината на амплитудата на струјата на молњата (kA) додека на ординатната оска е нанесена веројатноста, изразена во (%), струјата на молњата при едно празнење да не ја надмине вредноста отчитана од апсцисната оска.

²Кумулативната веројатност се дефинира преку тнр. „функција на распределба“ на случајна променливата величина. Функцијата на распределба $F(x)$ на една случајна променлива величина x се дефинира на следниот начин: $F(x) = \int_{-\infty}^x f(x)dx$ каде што $f(x)$ е таканаречената „густина на веројатноста“ на случајната променлива x . Таа ја дава веројатноста случајната променлива x да не ја надмине вредноста X , т.е. $P(x < X)$. Функцијата $Q(x) = 1 - F(x)$ е комплементарната функција на $F(x)$ и ја дава тнар. „кумулативна веројатност“, т.е. веројатноста случајната променлива x да ја надмине вредноста X , т.е. $P(x > X)$.

Вака упростениот начин на определувањето на ризикот за појава на повратен прескок со помош на критериумот (5.1) и табелите (5.1) односно (5.2) е, секако, за подетални анализи, неприфатлив. Тој може да се применува само за ориентациони проценки при прелиминарните анализи на разните можни варијанти на заземјувачките системи. Кога се работи за високонапонски водови, особено за водови што се од особено значење за работата на електроенергетскиот систем, пресметките на ризикот за појава на повратен прескок треба да се вршат со други, посовремени методи, кои покрај уважувањето на стохастичкиот карактер на параметрите на громот, водат сметка и за многу други појави што се случуваат при атмосферските празнења.

5.2 Техничка препорака ТП-9 [12]

Секоја земја си изготвува технички препораки за решавање на техничките проблеми во разни области од стопанството. Техничките препораки се во принцип договорни правила на однесување и насоки на дејствување, теориски докажани и практично проверени. Тие од една страна водат сметка за техничката сигурност и исправноста, условите за безбедност и сл, а од друга, водат сметка и за економичноста и рационалноста на применетото решение. Кога зборуваме за заземјување на столбовите од надземните водови кај нас во континуитет се применуваат одредбите од Техничката препорака бр. 9 на Електростопанството на Србија (ЕПС) [12]. Ова препорака се однесува на изведбата на заземјувањето и на заземјувачите на столбовите на надземните електроенергетски водови за напон 1, 10, 20, 35, и 110 kV. Таа е усогласена со постојните важечки македонски прописи и стандарди, и претставува еден вид збирка од насоки, корисни за практична примена.

5.2.1 Основни технички услови за изведување на заземјувањето на столбовите според ТП-9

Според оваа препорака металните и армиранобетонските столбови треба да се заземјат и притоа за секој столб треба да се изведе посебен заземјувач. За столбовите од дрво или од некој друг изолационен материјал не се изведуваат посебни заземјувачи освен во случаите кога тие се снабдени со заштитно јаже, метална лента за заштита од удар на гром, одводници на пренапони и слично. Металните конзоли на овие столбови како и металните основи на линиските разделувачи не се заземјуваат.

Заземјувачите на столбовите од надземните водови се положуваат во земјата на длабочина од околу 0,7 m. Кај заземјувачите составени од два прстена, првиот прстен се поставува на длабочина од 0,7 m и на растојание 1 m од телото на столбот, додека вториот се поставува на длабочина од 1 m и на растојание од најмалку 2 m од телото на столбот.

Заземјувачите се изведуваат со еден или повеќе прстени, во форма на звезда со повеќе краци (зракасти заземјувачи) или пак се изведуваат како некоја нивна комбинација.

Прстенестите заземјувачи можат да бидат направени од еден или од два прстена и имаат предност во услови на ограничен простор, како и во сите случаи каде треба да се земе предвид заштитата од превисок напон на допир.

Зракастите заземјувачи се изведуваат со четири краци, додека на места со ограничен простор, тие се изведуваат со три, односно два крака. Тие имаат предимство пред прстенестите заземјувачи кај водовите кои се наоѓаат на терени со силни и зачестени атмосферски празнења, особено кај водовите со кои се врши радијално напојување на важни потрошувачи. Се применуваат и за заземјување на столбните места на кои се наоѓаат одводници на пренапони.

Како материјал за изведување на заземјувачите треба да се користи округла поцинкувана челична жица со дијаметар 10 mm. Дозволено е користење на поцинкувани челични ленти со пресек од најмалку 100 mm², но не потенки од 3,5 mm. Дебелината на цинкот над челикот треба да изнесува најмалку 70 m. Во исклучителен случај, кога почвата е агресивна спрема челикот (железото), како заземјувач треба да се користи бакарно јаже со пресек од најмалку 35 mm².

5.2.2 Основни критериуми за димензионирање на заземјувачите на столбовите

Според Препораката [12] основен критериум за димензионирање и изведба на заземјувачите од надземните водови е заштитата на водот од повратни прескоци при удари на гром во столбот или во заштитното јаже. Во посебни случаи треба да се задоволи и критериумот за заштита од превисоки напони на допир.

Според оваа препорака се смета дека е постигнато задоволително ниво на заштита од повратни прескоци ако ударната (импулсната) отпорност на заземјување е $R_Z < 15 \Omega$. Ако оваа вредност не може да се постигне на економичен начин, кај одделни столбови ќе треба да се засили нивната изолација или на тој дел од водот да се толерира зголемен број дефекти.

Условите за безопасност од превисоки напони треба да се задоволат во следните случаи

- кај столбови кои се наоѓаат на терени како што се: јавни базени, кампови, детски игралишта и др. без разлика на напонското ниво на водот и начинот на заземјување на неутралната точка;
- кај столбови кои се наоѓаат на обработливи површини, покрај прометни патишта и во населени места, кога неутралната точка на мрежата е изолирана;
- кај столбови на кои се наоѓаат линиски разделувачи.

Според овие препораки условите за безопасност се задоволени ако кај столбот не може да се појави траен напон на допир поголем од 65 V.

Избор на конфигурацијата и типот на заземјувачите според Препораката ТП-9

Препорака ТП-9 [12] во основа дава насоки кои му помагаат на проектантот при изборот на типот и димензиите на заземјувачот. Изборот на конфигурацијата и димензиите на заземјувачите од надземните водови, според одредбите на оваа препорака, треба да се врши

- врз основа на избраната вредност на струјата на громот во столбот или во заштитното јаже и
- врз основа на познатата вредност на струјата на еднофазна куса врска/земен спој.

Според ТП-9 [12], заземјувачите на столбовите од надземните водови се изведуваат обично со еден или повеќе прстени, (во форма на круг, квадрат или правоаголник), во форма на ѕвезда со повеќе зраци или пак се изведуваат како некоја нивна комбинација. Заземјувачите на столбовите кај 10 kV, 20 kV, и 35 kV надземни водови обично се изведуваат како *прстенести*, со еден прстен на растојание $1,0 \div 1,3$ m од работ на столбот, или пак со два прстена. Првиот прстен служи за обликување на потенцијалот околу столбот и за намалување на потенцијалната разлика на допир E_d . Кога е сам, се поставува на длабочина од $0,7 \div 0,8$ m, додека кога постојат два (или повеќе) прстена, се поставува на длабочина од 0,5 m. Вториот прстен, пак, ако го има, се поставува на длабочина од 1 m и служи за намалување на отпорноста на распростирање R_Z и на напонот на чекор.

Изборот на контурните и прстенести заземјувачи е сврзан со условите за заштита од превисоки напони на допир и чекор. Со погоден избор на соодветната конфигурација (еден или два прстена, употреба на дополнителни хоризонтални краци и слично) и со погоден избор на димензиите и длабочината на закопување на заземјувачот,

проектантот се труди да ја постигне бараната вредност на отпорноста на распростирање R_z , но и да обезбеди најповолна распределба на потенцијалите во околината на посматраното столбно место. При ваквиот избор проектантот се служи со разни табели во кои се дадени отпорностите на распростирање и други карактеристики на голем број типски заземјувачи на столбовите (на пример сликите 5.17 ÷ 5.19).

Прстенестите заземјувачи се состојат од прстен којшто обично се поставува на длабочина од 0,7 ÷ 0,8 m. Исклучок се местата со заострени барања во поглед на исполнување на условите за безопасност и таму се користат заземјувачи со два прстена. Во тој случај првиот прстен се поставува на длабочина од 0,5 m и на оддалеченост 1 ÷ 1,5 m од столбот, додека вториот прстен се поставува на длабочина од 1 m и на растојание најмалку 2 m од столбот. Прстенестите заземјувачи имаат предност во услови на ограничен простор, како и во случаите каде што треба да се подобри заштитата од превисок напон на допир.

Кога единствен критериум за избор и димензионирање на заземјувачите е заштитата на водот од атмосферски пренапони, тогаш Препораката ТП-9 препорачува примена на *зракастите заземјувачи*. Тие се применуваат тогаш кога поради високата специфична отпорност на тлото или поради релативна непристапност до столбното место, не се бара никаква заштита од влијанието на напонот на чекор/допир на лице место.

Бројот на краците (лентите) на зракастиот заземјувач се одбира во согласност со реалните услови и можноста на нивно полагање на терен, но и врз основа на вредноста на специфичната отпорност ρ на посматраното столбно место. Нивната должина се одбира водејќи сметка за условите за безопасност, односно условот за заштита од повратен прескок.

Во поглед на дилемата дали на теренот со висока специфична отпорност да се предвиди заземјувач со два, три или пак со четири краци, треба да се има предвид следното. Заземјувачите со два крака (до определена должина на краците) се најекономично решение. Заземјувачот со три краци претставува порационално и поекономично решение од оној со 4 краци, но со иста вкупна должина. Употребата на четвртиот крак во таа смисла има оправдување само тогаш кога се сака да се постигне поповолна распределба на потенцијалите во околината на столбното место.

5.3 Изведба на заземјувањето на столбовите

5.3.1 Изведба на заземјувањето на нисконапонските столбови

За металните и армиранобетонските столбови на нисконапонските водови не се преземаат посебни заштитни мерки во поглед на исполнување на условите за безбедност. Исклучок се столбовите што се наоѓаат на терени како што се камповите, детските игралишта, парковите, шеталиштата и слично, каде што треба да се врши обликување на потенцијалот со прстенест заземјувач околу столбот, поставен на далечина 1 m од работ на столбот и закопан на длабочина 0,5 m. Слични ефекти се постигаат и со изолирање на стојалиштата околу ваквите столбови во ширина од најмалку 1,25 m по пат на асфалтирање или пак со нанесување на крупен слабоспроводен песок.

Ако во нисконапонската мрежа и во електричните инсталации на потрошувачите се применува TN-системот на заштита (т.н. „нуловање“ според старата терминологија) како заштитна мерка од превисок напон на допир, столбовите не се поврзуваат со неутралниот спроводник, т.е. не се „нуловаат“. Исклучок се оние столбови кај кои што е потребно да се изведе заземјување на неутралниот (нултиот) спроводник заради намалување на неговата еквивалентна отпорност (импеданција). Кај таквите столбови нултиот спроводник преку водот за заземјување директно се поврзува со заземјувачот на столбот. Самиот заземјувач, пак, во тој случај се изведува во вид на прстен.

НН столбови на кои што се поставени одводници на пренапони исто така се заземјуваат. Заземјувачот во тој случај треба да има форма на звезда со 4 краци. Доколку е предвидено на тоа столбно место истовремено да се изврши и обликување на потенцијалите, тогаш заземјувачот треба да има форма на кружен прстен.

5.3.2 Изведба на заземјувањето на столбовите на 10 kV и 20 kV водови

Заземјувачите на столбовите за 10 односно 20 kV, според Препораката ТП-9, треба да се изведуваат со еден прстен (слика 5.9) или како звезда со четири краци (слика 5.4). По исклучок, тие се изведуваат со два прстена (слика 5.10) или како звезда со три или два крака (слика 5.5 ÷ слика 5.7).

Според Препораката ТП-9 критериумот за заштита од повратен прескок е задоволен ако импулсната отпорност на заземјувањето е $R_Z \leq 15 \Omega$. Доколку тоа не може да се постигне на економичен начин, на овој дел од водот треба да се очекуваат зголемен број на дефекти.

Ако во текот на работата на водот се утврди дека одделни столбови се особено подложни на дефекти поради атмосферски празнења, на таквите столбови ќе треба да се подобрат заземјувачите или пак на тие столбни места да се засили електричната изолација.

Кај мрежите со незаземјена (изолирана) неутрална точка задолжително е задоволување на условите за безопасност од превисоките напони на допир и чекор кај столбовите што се лоцирани во населените места, покрај прометните патишта и на обработливите површини.

Кај мрежите со заземјена неутрална точка преку мала отпорност не е потребно димензионирање на заземјувачите според критериумот за заштита од превисоки напони на допир. Исклучок се столбовите кои се наоѓаат на терени каде што треба да се запазат условите за безопасност. Кај нив заземјувачите се изведуваат со два прстена.

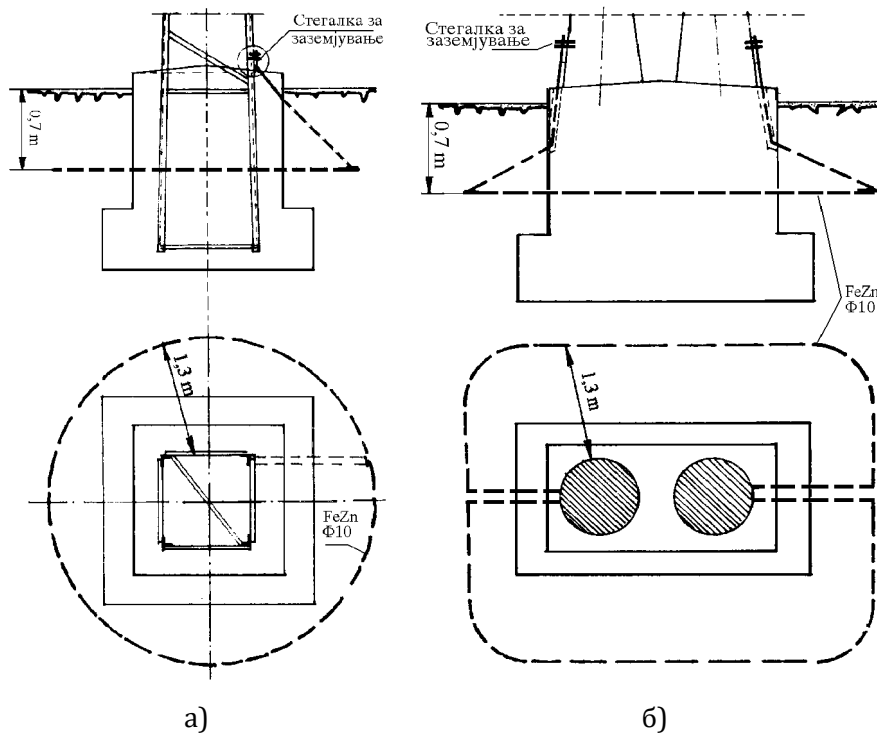
5.3.3 Изведба на заземјувањето на столбовите на 35 kV водови според ТП-9

Заземјувачот кај овие столбови се изведува со еден прстен на растојание 1,3 m од столбот. На сликата 5.2 е прикажан пример за изведба на заземјувач на еден носечки челично-решаткаст столб (слика 5.2а) и на еден специјален бетонски столб, чиј темел има форма на правоаголник (слика 5.2б). По исклучок, кога се бара зголемена безбедност (за столбовите што се наоѓаат на терени какви што се плажите, детските игралиштата, спортските терени, камповите и слично) се препорачува изведба со два прстена. Понекогаш, кога далекуводот е изложен на интензивни атмосферски празнења, поповолно е тој да биде изведен во форма на ѕвезда со четири или три краци, според слика 5.4 односно слика 5.5.

Кога неутралната точка во 35 kV мрежи е заземјена преку мала отпорност, тогаш не е потребно димензионирање на заземјувачот спрема критериумот за заштита од превисоки напони на допир. Исклучок се столбовите што се наоѓаат на претходно споменатите терени, каде што треба да се запазат условите за безопасност. Кај нив заземјувачот се изведува со два прстена, и тоа е доволна мерка за задоволување на условите за безопасност.

Кај столбовите на кои се поставени одводници на пренапони како заземјувач на се користи 4 крака ѕвезда со должина на краците од по 2,5 m. Доколку за таквото столбно место е предвидено обликување на потенцијалот, тогаш заземјувањето се врши со заземјувач со еден или со два прстена.

Ако некои столбови се посебно подложни на дефекти поради атмосферски празнења, треба да се подобрат заземјувачите на таквите столбови или пак да се засили изолацијата на тие столбови.

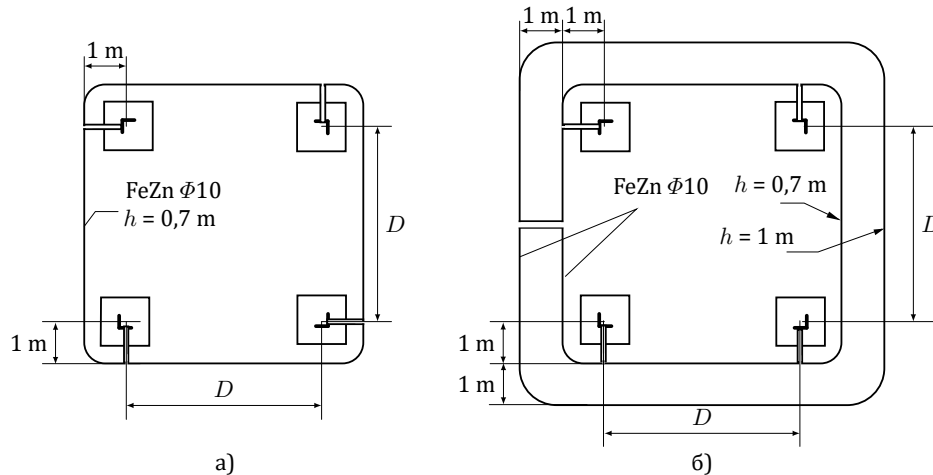


**Слика 5.2. Изведба на заземјувачите кај 35 kV надземни водови
а) челично-решеткаст и б) бетонски – специјален**

5.3.4 Изведба на заземјувањето на столбовите на 110 kV водови

За заземјување на 110 kV столбови ТП-9 препорачува прстенести заземјувачи. Темелот на овие столбови е расчленет, составен од четири стопи (слика 5.14а,б), симетрично поставени во однос на оската на столбот. Растојанието помеѓу стопите зависи од висината на столбовите и се движи од 2.5 m за најмалите до 6 m за највисоките столбови. Околу темелот се поставува контурен заземјувач со квадратна форма, на длабочина $h \approx 0,7$ m и на растојание 1 m од работ на темелот, т.е. габаритот на столбот (слика 5.3а). Заземјувачот се поврзува барем на две места со конструкцијата на столбот. Кај столбовите со 4 стопи се

препорачува секој крак (стопа) на столбот да има свој приклучок на заземјувачот.



Слика 5.3. Изведба на прстенестите заземјувачите кај 110 kV водови
а) една контура (фамилија K1) б) две контури (фамилија K2)

По исклучок, кога столбот се наоѓа покрај детско игралиште, камп, плажа, прометен пат и сл, каде што е неопходно да се запазат условите за безбедност (обликување на потенцијалот), заземјувачот од столбот задолжително се изведува со две контури (слика 5.3 б). Притоа, втората контура се поставува на растојание 1 m од првата и на длабочина од ≈ 1 m.

Неутралната точка од 110 kV и 400 kV мрежи кај нас е директно заземјена, па секој земјоспој претставува всушност еднофазна куса врска, која за многу кусо време ($0,1 \div 0,2$ s) се исклучува од страна на релејната заштита. Затоа, овде прописите не бараат посебни пресметки и проверки на големината на напоните на допир, ниту пак вршат друг вид ограничувања.

Ако некои столбови се посебно подложни на дефекти поради атмосферските празнења, заземјувачите на таквите столбови ќе треба да се подобрат, или пак ќе биде потребно изолацијата на столбовите да се засили, или да се применат обете мерки.

5.3.5 Примена на заштитни јажиња

Заштитното јаже служи за заштита на водот од директен удар на гром. Се поставува доволно високо над фазните спроводници така да обезбеди заштитен агол од најмногу 30. Според Препораката ТП-9, надземните водови со номинален напон $U_n \geq 35$ kV се изведуваат со

заштитно јаже. 110 kV водови се градат по целата должина со заштитно јаже, додека должината на заштитното јаже на 35 kV водови треба да изнесува најмалку 1 km пред постројката која ја напојува тој вод.

Водовите за 10 kV и 20 kV се градат без заштитно јаже. Исклучок се водовите кои што минуваат низ терени со зачестени атмосферски празнења и водовите кои напојуваат важни објекти (магацини, војни објекти, радио и ТВ предаватели и слично)

Заштитно јаже не се поставува на нисконапонските водови.

5.3.6 Мерење на отпорноста на распростирање на заземјувачите на столбовите

Со Препораката ТП-9 се предвидува, пред активирање на високонапонскиот вод, да се изврши мерење на отпорноста на распростирање на заземјувачот кај секој столб за кој е изведен посебен заземјувач. Мерењето се врши со преносен мерен уред со сопствен извор на наизменична струја со фреквенција до 150 Hz и се изведува без одвојување на заземјувачот од конструкцијата на столбот, заедно со заштитното јаже. Се смета дека заштита од повратен прескок е постигната ако со мерењето се добие

$$R \approx R_i = \begin{cases} 15 \Omega & \text{за столбови без заштитно јаже,} \\ 10 \Omega & \text{за столбови со заштитно јаже.} \end{cases}$$

За столбови со заштитно јаже се препорачува и мерење на ударната отпорност на распростирање на заземјувачот со високофреквентен уред. Мерењето се врши со споени заземјувач и заштитно јаже, но се добиваат вредности како да е заштитното јаже одвоено од столбот. Се смета дека заштитата од повратен прескок е постигната ако со мерењето се добие

$$R_i \leq 10 \Omega.$$

Специфичната отпорност на распростирање на тлото посебно не се мери.

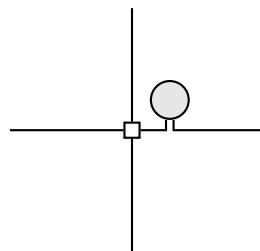
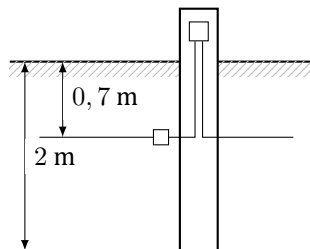
5.4 Типски заземјувачи на столбовите од НВ

Правилникот [13] па дури и техничката препорака [12] сепак му оставаат на проектантот можност за широк избор на типот и димензиите на заземјувачот. Изборот треба да се темели на традицијата, искуството и интуицијата на проектантот. За таа цел вообичаено е воведување и работа со фамилија на т.н. „типски„ заземјувачи.

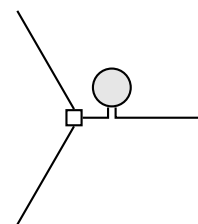
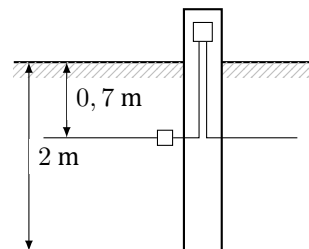
5.4.1 Зракасти заземјувачи

Општо гледано постојат пет фамилии типски зракасти заземјувачи. Се изработуваат од FeZn жица со дијаметар 10 mm ($\Phi 10$), а се разликуваат по бројот на зраци или во нивниот распоред. Должината на зраците е од 1 до 20 m, зависно од спец. отпорност ρ на тлото во кое се поставува заземјувачот и отпорноста на распростирање што се сака да се постигне. Зраците се закопуваат на длабочина од 0,7 m. При анализите на сите фамилии зракасти заземјувачи вршени за потребите на овој учебник, усвоено е дека тие се користат за заземјување на армиранобетонски столбови со дијаметар во основата 250 mm, при што е земено предвид и влијанието на арматурата на столбовите. Притоа челичната арматура на столбот се моделира со вертикален цилиндер со должина $l_s = 2$ m и преченик $d_s = 200$ mm.

Секој типски зракаст заземјувач има своја ознака и карактеристики. Ознаките на сите фамилии зракасти заземјувачи, воведени во учебников, започнуваат со буквата L (а оние со специфичен облик ја имаат и буквата со која се искажува обликот). Остатокот од ознаката се цифри со кои се означува бројот на зраците и нивната должина. На пр. L2×10 е ознака за заземјувач со два зрака, секој со должина од по 10 m.



Слика 5.4. Скица на заземјувач од фамилијата L4

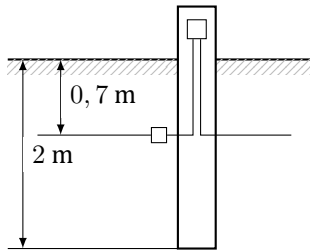


Слика 5.5. Скица на заземјувач од фамилијата L3

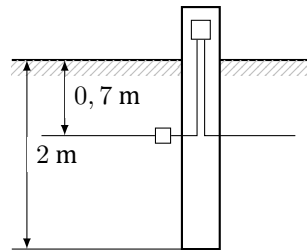
Заземјувачите од фамилијата L4 се состојат од 4 зраци со иста должина, (слика 5.4). Кај нив потенцијалната разлика на чекор E_c и допир E_d се најголеми во правец на симетралите на квадрантите.

Заземјувачите од фамилијата L3 се составени од три зраци со иста должина поставени под агол од 120° како на сликата 5.5. Најголемите потенцијални разлики на чекор E_c и на допир E_d , слично како и во претходниот случај, се јавуваат во симетралите на аглите.

Заземјувачите од фамилијата LT3 се составени од три зраци со иста должина поставени во форма на буквата T, (слика 5.6). Најголемите потенцијални разлики на чекор E_c и на допир E_d се јавуваат во правец спротивен од правецот на средниот крак.



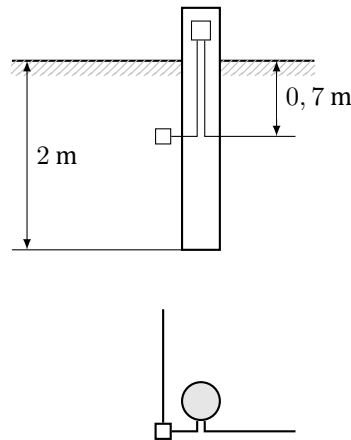
Слика 5.6. Скица на заземјувач од фамилијата LT3



Слика 5.7. Скица на заземјувач од фамилијата L2

Заземјувачите од фамилијата L2 се составени од два зрака со иста должина поставени под агол од 180° (слика 5.7). Најголемите потенцијални разлики на чекор E_c и на допир E_d се јавуваат во правец нормален на краците.

Заземјувачите од фамилијата LT2 се составени од два зрака со иста должина поставени под прав агол, (слика 5.8). Најголемите потенцијални разлики на чекор E_c и на допир E_d се јавуваат во правец на симетралата на надворешниот (тап) агол.

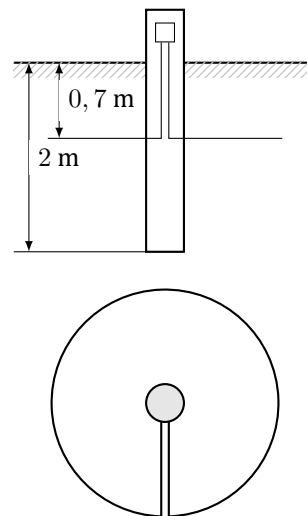


Слика 5.8. Скица на заземјувач од фамилијата LT2

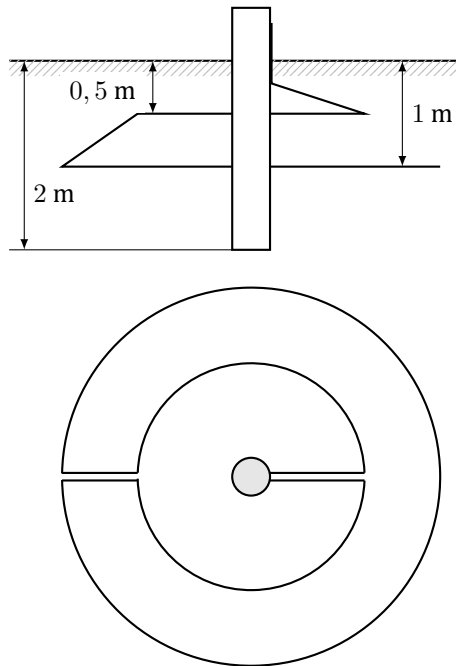
5.4.2 Прстенести заземјувачи

Овие заземјувачи се применуваат како заземјувачи на 10, 20 и 35 kV армиранобетонски столбови. Се изведуваат во две фамилии означени во учебников со ознаките P1 и P2. Заземјувачите од фамилијата P1 се со еден прстен, во форма кружница, поставен на длабочина од $0,7 \div 0,8$ m и со радиус R од 1 до 6 m, (слика 5.9). Заземјувачите од втората фамилија P2 се со два прстена од кои првиот е на длабочина од 0,5 m и со радиус R_1 од околу 1 m, а вториот прстен е на длабочина од 1 m и со радиус R_2 за најмалку 1 m поголем од радиусот на првиот (слика 5.10). Прстените се изработени од поцинкувана челична жица со дијаметар 10 mm. Во означувањето е усвоено втората и третата цифра во ознаката да го означува радиусот на првиот прстен во m. Така, на пример, ознаката P1 2.0 означува заземјувач со еден прстен со радиус 2,0 m.

Кај овие заземјувачи поради симетрија потенцијалните разлики на чекор E_c и на допир E_d се исти во сите правци.



Слика 5.9. Скица на заземјувач од фамилијата P1

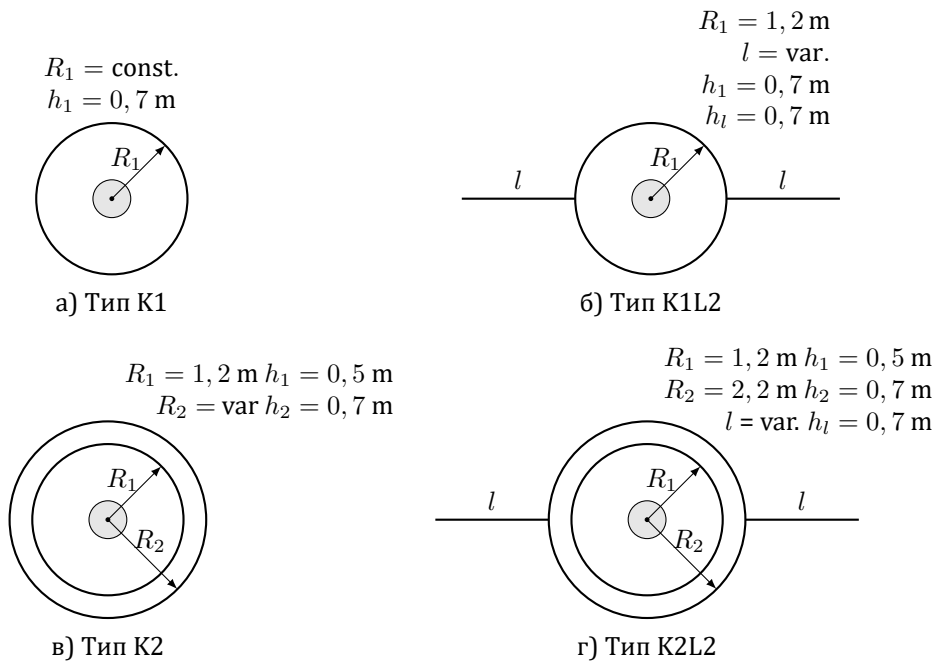


Слика 5.10. Скица на заземјувач од фамилијата P2

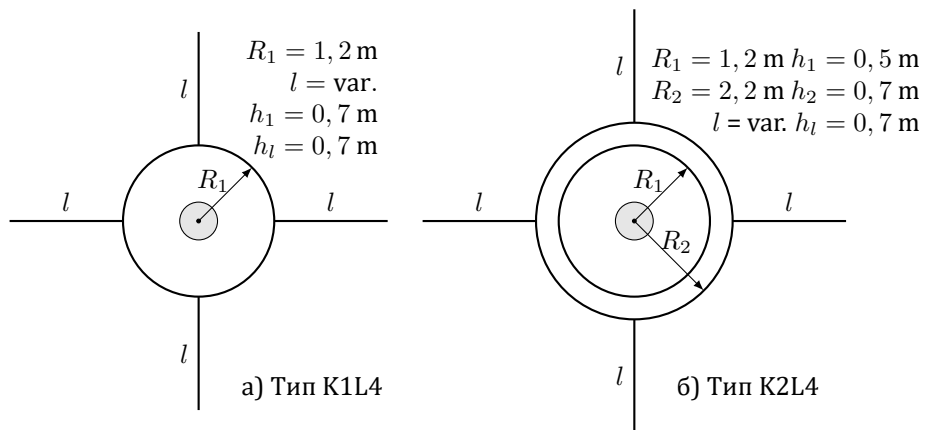
5.4.3 Комбинирани прстенести-зракасти заземјувачи

Во [19] е предложена е фамилија типски заземјувачи за столбовите од среднапонските надземни водови. Тие претставуваат комбинација од прстенестите и зракастите заземјувачи и ги поседуваат предностите и од обете фамилии заземјувачи. Имено, со прстенестиот дел од заземјувачот се постигнува поволно обликување на потенцијалите во близината на самиот столб, додека со зраците (краците) во основа се врши намалување отпорноста на распростирање на заземјувачот. Изгледот на овие типски форми заземјувачи е прикажан на сликите 5.11 – 5.13.

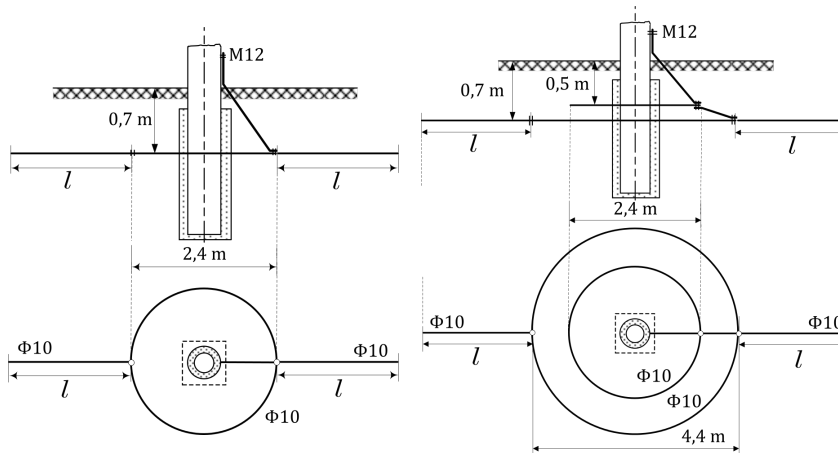
За секој од типските заземјувачи се пресметани основните параметри: отпорноста на распростирање и максималните потенцијални разлики на допир и чекор. Резултатите од пресметките се прикажани во наредниот дел форма на табели. Исто така направен е кус осврт и е даден коментар на делот од техничките прописи [13] којшто се однесува на заземјувањето на надземни водови. Прикажан е и начин на кој, со помош на изготвените табели, е можен рационален избор на заземјувачите од надземни водови во согласност со постојната техничка регулатива.



Слика 5.11. Скици на заземјувачи од типот К1, К1L2×l, К2 и К2L2×l



Слика 5.12. Скици на заземјувачи од типот К1L4×l и К2L4×l



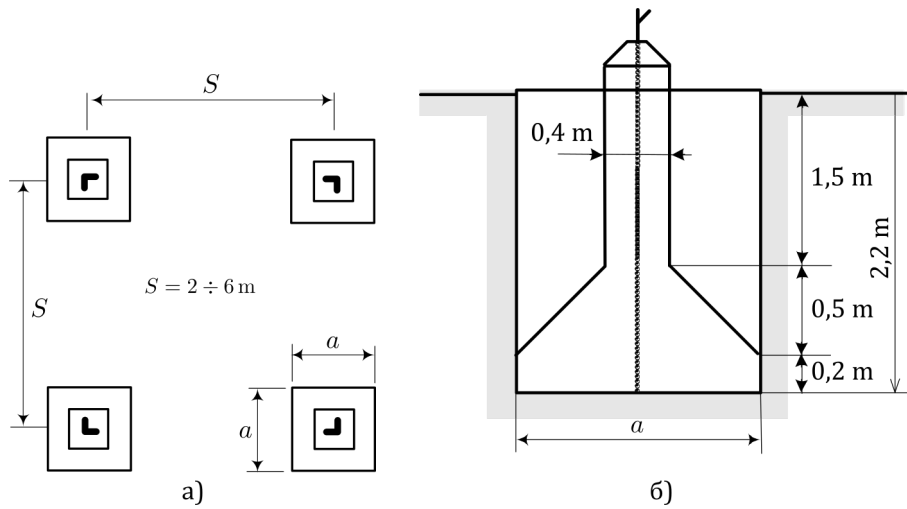
Слика 5.13. Скици на заземјувачи од типот K1L2 и K2L2

5.4.4 Типски заземјувачи на столбовите за висок и највисок напон

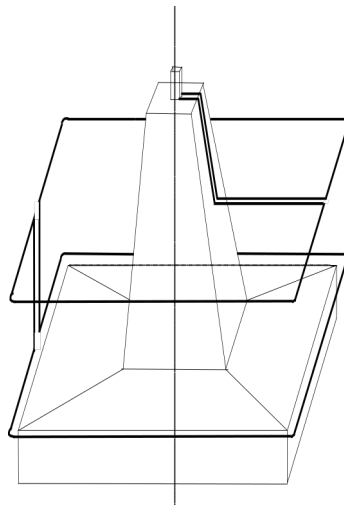
За заземјување на челично ретчатите столбови на ВН надземни водови ($U_n \geq 110 \text{ kV}$) се употребуваат контурни заземјувачи. Темелот на овие столбови е расчленет, составен од 4 симетрично поставени стопа, (слика 5.14а). На сликата 5.14б е прикажан надолжниот пресек на една стопа со просечни димензии за еден 110 kV столб. Растојанието помеѓу стопите S , кое се движи од 2,5 m до 6 m, зависи од висината на столбовите. Вистинските димензии на стопата, пак, зависат од носивоста на тлото. Ширината на стопите кај 110 kV водови обично се движи во интервалот $1,3 \leq a \leq 1,8 \text{ m}$ додека кај 400 kV водови тие се скоро двојно поголеми. Вообичаените вредности на останатите димензии на стопата кај 110 kV водови се прикажани на сликата 5.14б.

Заедничко за сите заземјувачи на овие столбови е тоа што околу секоја од четирите стопа на темелот се поставуваат по два прстена во форма на квадрат (слика 5.15). Првиот е предвиден да се постави на длабочина од 0,5 m, додека вториот се поставува на длабочина во согласност со длабочината на стопата (најчесто на длабочина $2 \div 2,5 \text{ m}$). На тој начин се добива заземјувачот од типот А (слика 5.16).

Покрај прстените, поставени околу секоја стопа, кај некои заземјувачи, означени како тип В, е предвидено поставување на уште еден дополнителен прстен на длабочина од $0,7 \div 0,8 \text{ m}$, со кој што се опфатени сите 4 стопа од темелот. Овој прстен исто така има форма на квадрат или правоаголник со променлива страница, а неговата димензија зависи од меѓусебното растојание на стопите, т.е. повторно зависи од височината на столбот и носивоста на тлото.



Слика 5.14. а) Распоред на стопите на темелот; б) Надолжен пресек на една стопа



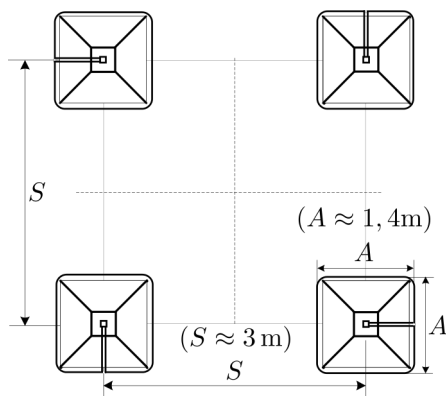
Слика 5.15. Изглед на заземјувачот околу стопата

Дополнителниот прстен се поставува така што се наоѓа на хоризонтална оддалеченост 1 m од страниците на ногарите од стопите на темелот (слика 5.17).

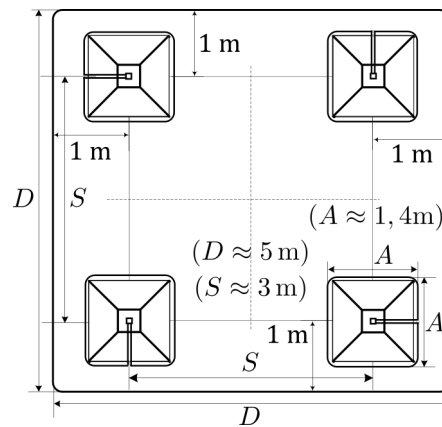
Заземјувачите од типот А (без заеднички правоаголен прстен околу стопите на столбот) се најчесто во примена, како наједноставни и најевтини. Заземјувачите од типот В, со заеднички правоаголен прстен во форма на правоаголник се наменети за оние столбни места кај кои луѓето (или животните) имаат лесен пристап (населено место,

близина на прометен пат, нива, парк, кампинг и слично). Кај нив со вметнувањето на заедничкиот прстен околу сите 4 стопи се намалува отпорноста на распространување на заземјувачот и се врши обликување на потенцијалот во околината на столбот, со цел да се намали ризикот поради можноста за појава на преголеми напони на чекор/допир при појава на куси врски на водот.

Освен прстените, поставени околу секоја стопа, понекогаш, кај некои од типските заземјувачи кај кои се бара намалување на отпорноста на распространување R_Z , се предвидува и дополнително поставување на 2÷4 хоризонтални зраци (краци или испусти). Хоризонталните зраци се особено ефикасни на терените со зачестени атмосферски празнења бидејќи придонесуваат за значителното намалување на бројот на испадите на надземните водови под дејство на атмосферските празнења, со цел да се избегне влијанието на сезонската варијација на количеството влага во тлото врз карактеристиките на заземјувачот пожелно е зраците да се закопуваат на длабочина од 0,7 ÷ 0,8 m. Тие можат да имаат променлива должина l ($l = 5 \div 40$ m). Овие зраци обично се произведуваат од поцинкувано валчесто железо $\Phi 10$ или $\Phi 12$, или пак од поцинкувана челична лента FeZn 30×4.



Слика 5.16. Изглед на заземјувачот од типот А (поглед од горе)

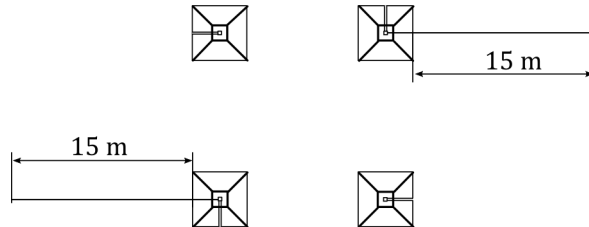


Слика 5.17. Изглед на заземјувачот од типот В (поглед од горе)

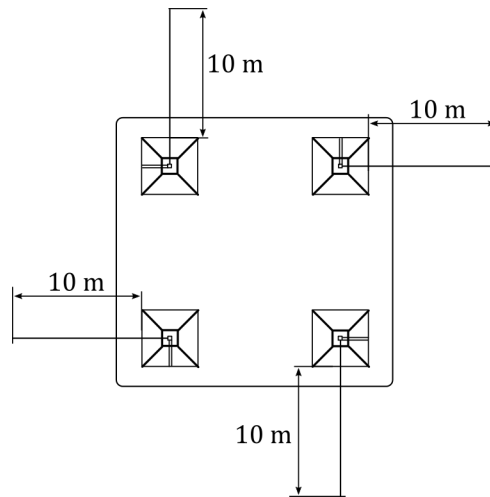
На сликата 5.18 е прикажана скицата на типски заземјувач од фамилијата A2L ($l=15$ m), додека на сликата 5.19 е прикажана скицата на типски заземјувач од фамилијата B4L ($l=10$ m).

Има случаи, особено кај 400 kV надземни водови, кога заземјувачите да се изведуваат и со две правоаголни контури. При тоа првата контура се поставува на длабочина од 0,7 m и на растојание 1 m од работ на

стопите, а втората на длабочина 1 m и на растојание 1 m од првата. Во сите горенаведени случаи контурите се изработени од поцинкувана челична жица со дијаметар 10 mm.



Слика 5.18. Скица на заземјувачот тип $A2 \times 15$



Слика 5.19. Скица на заземјувачот тип $B4 \times 10$

5.5 Основни карактеристики на типските заземјувачи на надземните водови

Во постапката за решавање на заземјувачкиот систем на еден вод се тргнува од идејата за постоење на фамилија типски заземјувачи. Изборот на типските заземјувачи, притоа, треба да базира на претходни теориски анализи и да е осмислен така што тие од една страна да ги задоволат условите предвидени со техничките прописи, а од друга страна, максимално ќе се води сметка за економичноста.

При изборот на конфигурацијата и димензиите на типските заземјувачи е потребно да биде консултирана соодветна стручна литература. Испитувањата на основните карактеристики на типските

заземјувачи (отпорноста на распростирање R_Z , потенцијалната разлика на чекор E_c , потенцијалната разлика на допир E_d , цената на чинење и др.) се вршат на модел со хомогено тло, и покрај тоа што во стварност овие заземјувачи обично работат во услови на хетерогено тло. Тоа се прави така од едноставна причина што во случаите на повеќеслојна средина, бројот на комбинациите што можат да се јават е практично неограничен, па креирањето на типските заземјувачи и нивната заемна споредба тогаш станува неможна. Се разбира дека, откако ќе се изврши изборот на типските форми на заземјувачите, сите натамошни пресметки на отпорите на распростирање и другите нивни параметри ќе се вршат во реални услови, водејќи сметка за вистинските карактеристики на почвата. Пресметките на карактеристиките на типските форми заземјувачи се вршени со помош на програмскиот пакет `zaz`.

При моделирањето и димензионирањето на заземјувачите на металните и армирано-бетонските столбови потребно е да се земе предвид и влијанието на темелите на столбовите бидејќи тоа најчесто не е занемарливо. Темелите обично се земаат предвид на тој начин што се моделираат со некакви упростени правилни форми. На пример цилиндричниот темел кај армирано-бетонските столбови сосема коректно може да се замени со соодветен вертикален цевкаст заземјувач, додека едноблоковиот темел на челично-решеткастите столбови може приближно но сепак успешно да се еквивалентира со модел на полутопка чија што површина ќе биде еднаква на површината на бочните страни од темелот, итн.

Вршени се пресметки на отпорностите на распростирање R_Z на одделните заземјувачи во услови кога се тие поставени во хомогено тло со специфична отпорност $\rho = 100 \Omega\text{m}$. Пресметките се вршени со помош на компјутерска програмата базирана на моделот од глава 3, а при тоа е опфатено и влијанието на темелите. Во наредниот дел од текстот се прикажани резултатите од некои од пресметките.

5.5.1 Типски заземјувачи за СН столбови 10, 20 и 35 kV

а) Зракасти заземјувачи

Параметрите на зракастите заземјувачи R_Z , $E_{d,\text{max}}$ и $E_{c,\text{max}}$ во основа зависат од должината на секој од краците l , а многу помалку зависат од длабочината на закопување h и пречникот на електродите d . Врз споменатите параметри на заземјувачите, особено врз големините $E_{d,\text{max}}$ и $E_{c,\text{max}}$ влијае и самиот столб, односно неговиот темел и неговото присуство не смее да се занемарува. Во натамошниот дел ќе бидат прикажани параметрите на типските форми заземјувачи L2, LT2, L3, LT3

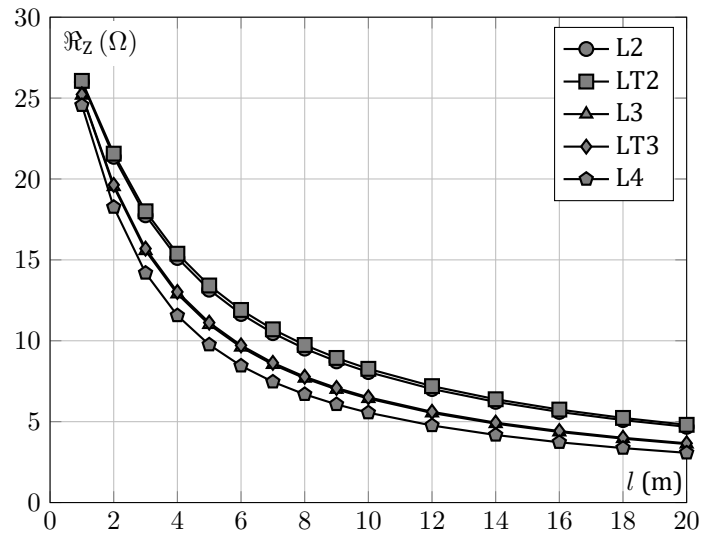
и L4, опишани во претходниот дел од оваа глава. Тие се однесуваат на случајот кога е $\rho = 100 \Omega\text{m}$, $d = 9 \text{ mm}$ и $h = 0,8 \text{ m}$. Темелот од столбот е притоа моделиран со цилиндер со пречник $D_S = 0,2 \text{ m}$ и должина $l_S = 2 \text{ m}$.

Во табелата 5.3 е прикажана зависноста на константата на отпорноста на распростирање $\Re_Z(l)$ за споменатите типови заземјувачи. На сликата 5.20 е прикажана во графичка форма истата таа зависност во услови на хомогено тло со $\rho = 100 \Omega\text{m}$.

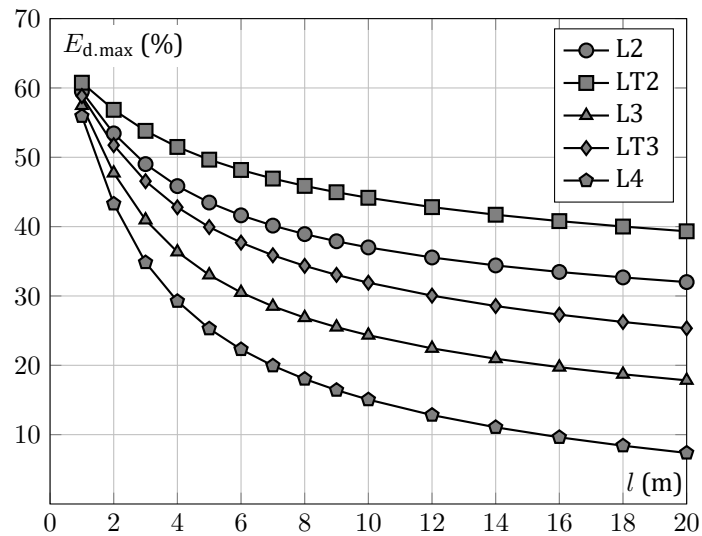
На сликата 5.21 е прикажана во зависноста на најголемата разлика на допир $E_{d.\text{max}}$ од должината на краците l кај разгледуваните типски заземјувачи. Најголемите потенцијални разлики на чекор $E_{c.\text{max}}$ не се прикажани бидејќи тие се помали од соодветните вредности на разликите на допир $E_{d.\text{max}}$.

Табела 5.3. Основни карактеристики на типските зракасти заземјувачи

$l \text{ (m)}$	$\Re_Z (\Omega)$				
	L2	LT2	L3	LT3	L4
1	25,997	26,077	25,191	25,242	24,573
2	21,113	21,311	19,275	19,384	18,031
3	17,589	17,838	15,433	15,557	14,078
4	15,005	15,268	12,811	12,936	11,502
5	13,078	13,338	10,950	11,068	9,724
6	11,596	11,845	9,569	9,679	8,430
7	10,426	10,663	8,507	8,609	7,449
8	9,480	9,703	7,665	7,760	6,680
9	8,699	8,909	6,979	7,070	6,061
10	8,043	8,242	6,416	6,497	5,551
12	7,002	7,180	5,531	5,603	4,761
14	6,212	6,373	4,871	4,935	4,176
16	5,592	5,738	4,359	4,416	3,725
18	5,091	5,224	3,948	4,001	3,366
20	4,677	4,800	3,613	3,661	3,074



Слика 5.20. Зависност на R_z кај зракасти заземјувачи од должината на нивните краци l



Слика 5.21. Зависност на $E_{d,max}$ кај зракасти заземјувачи од должината на краците l

б) Прстенести заземјувачи

Во табелата 5.4 се прикажани основните карактеристики на прстенестите заземјувачи од типот P1 (заземјувачи со еден кружен

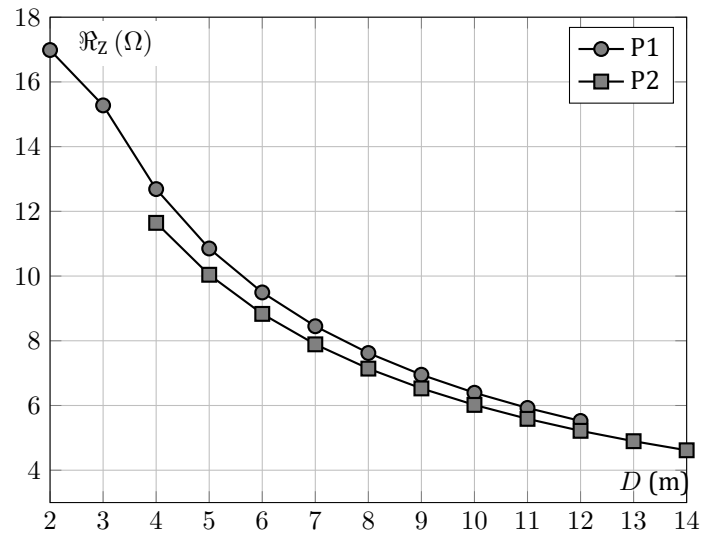
прстен, според сликата 5.9) и типот P2 (два кружни прстена, според сликата 5.10) во зависност од пречникот D на првиот, односно вториот прстен, во услови на хомогено тло со отпорност $\rho = 100 \Omega\text{m}$. И во овој случај темелот на столбот се моделира со цилиндер со пречник $d_S = 0,2 \text{ m}$ и должина $l_S = 2 \text{ m}$. Притоа кај прстенестите заземјувачи тип P1 кружниот прстен е со следните карактеристики: $d_1 = 9 \text{ mm}$; $h_1 = 0,8 \text{ m}$ и пречник $D = D_1$ кој што се менува во границите од 2 до 12 m. Кај заземјувачите од типот P2 првиот кружен прстен е со фиксен пречник $D_1 = 2 \text{ m}$; $d_1 = 9 \text{ mm}$ и $h_1 = 0,5 \text{ m}$, додека вториот кружен прстен е со променлив пречник $D = D_2 = 4 \div 14 \text{ m}$; и останати карактеристики: $d_2 = 9 \text{ mm}$ и $h_2 = 0,8 \text{ m}$.

Табела 5.4. Основни карактеристики на прстенестите заземјувачи тип P1 и P2

D (m)	тип P1			тип P2		
	\Re_Z (Ω)	$E_{d.\text{max}}$ (%)	$E_{c.\text{max}}$ (%)	\Re_Z (Ω)	$E_{d.\text{max}}$ (%)	$E_{c.\text{max}}$ (%)
2	16,985	30,3	26,7			
3	15,274	27,8	24,3			
4	12,687	28,1	22,4	11,644	19,1	19,3
5	10,852	29,4	22,6	10,040	18,4	18,4
6	9,494	30,5	22,8	8,831	18,4	18,4
7	8,449	31,4	23,1	7,890	18,6	18,3
8	7,622	32,2	23,3	7,140	18,8	18,3
9	6,950	32,7	23,5	6,528	19,0	18,3
10	6,393	33,2	23,7	6,018	19,2	18,3
11	5,924	33,6	23,8	5,587	19,4	18,4
12	5,522	34,0	24,0	5,217	19,6	18,4
13				4,897	19,7	18,5
14				4,616	19,9	18,5

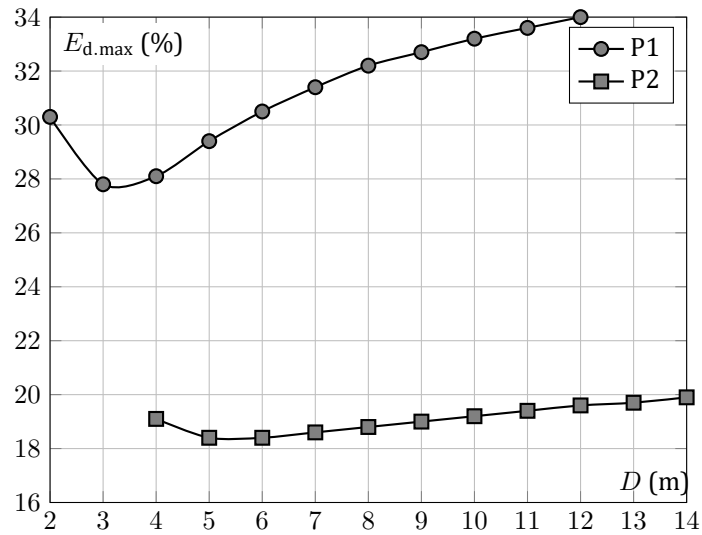
На сликата 5.22 е прикажана зависноста на отпорноста на распортирање \Re_Z кај прстенестите заземјувачи од пречникот D на прстенот ($D = D_1$) кај заземјувачите тип P1, односно од пречникот на вториот прстен ($D = D_2$) кај заземјувачите тип P2.

На сликата 5.23 е прикажана во зависноста на најголемата разлика на допир $E_{d.\text{max}}$ од пречникот D на првиот (кај заземјувачите тип



Слика 5.22. Зависност $R_z(D)$ кај прстенести заземјувачи со еден (P1) и два прстена (P2)

P1) односно вториот прстен (кај заземјувачите тип P2). Најголемите потенцијални разлики на чекор $E_{c,max}$ и во овој случај не се прикажани бидејќи тие се помали од соодветните вредности на разликите на допир $E_{d,max}$.



Слика 5.23. Зависност $E_{d,max}(D)$ кај прстенести заземјувачи

в) Комбинирани прстенести-зракасти заземјувачи

Од дијаграмите прикажани на сликите 5.22 и 5.23 е очигледно дека првиот (внатрешен) прстен кај двоконтурните прстенести заземјувачи од типот P2 многу малку влијае врз големината на отпорноста на распростирање на заземјувачот R_Z и служи, во основа, за поволно обликување на потенцијалот во околината на столбот, додека со вториот (надворешен) прстен се постигнува потребното намалување на отпорноста R_Z .

Истата идеја може да се спроведе и на друг начин. Имено ако улогата надворешниот прстен го замениме со два или четири хоризонтални краци, како кај комбинираниите заземјувачи од типот K1L2 односно K1L4 (слика 5.11 и 5.12) ќе ги постигнеме истите ефекти. Тоа била идејата од воведувањето на овој тип заземјувачи [19].

Основните карактеристики на овие заземјувачи се проучувани многу детално во [19]. Во табелите 5.5÷5.8 се прикажани некои од нив. Тие се однесуваат на следните услови: тло - хомогено, $\rho = 100 \Omega\text{m}$; спроводници (електроди): валчесто поцинкувано железо $\Phi 10$ ($d = 10 \text{ mm}$); длабочина на закопување: прв прстен $h_1 = 0,5 \text{ m}$; втор прстен и хоризонтални краци: $h_2 = 0,7 \text{ m}$; темелот на столбот е симулира со цилиндер со димензии $d_S = 0,2 \text{ m}$ и $l_S = 2 \text{ m}$.

Табела 5.5. Карактеристики на едноконтурните комбинирани заземјувачи од фамилијата K1 и K1L2

заземјувач тип K1				заземјувач тип K1L2 × l			
R_1	R_Z	$E_{d,max}$	$E_{c,max}$	l	R_Z	$E_{d,max}$	$E_{c,max}$
(m)	(Ω)	(%)	(%)	(m)	(Ω)	(%)	(%)
1,2	15,57	28,7	28,4	2	13,43	24,0	27,0
1,4	14,77	25,1	26,3	3	12,10	22,5	26,1
1,6	13,72	23,6	24,9	4	10,96	21,6	25,3
1,8	12,80	23,3	23,8	5	10,00	20,9	24,6
2,0	11,98	23,6	22,9	6	9,19	20,2	24,0
2,2	11,23	24,0	22,6	7	8,49	19,7	23,5
2,4	10,60	24,5	22,6	8	7,90	19,3	23,0
2,6	10,03	25,0	22,6	9	7,38	18,9	22,6
2,8	9,52	25,4	22,6	10	6,93	18,5	22,2
3,0	9,06	25,8	22,7				

Табела 5.6. Карактеристики на едноконтурните комбинирани заземјувачи од фамилијата K1L4

заземјувач тип K1L4×L			
l (m)	R_Z (Ω)	$E_{d.max}$ (%)	$E_{c.max}$ (%)
2	11,81	20,0	23,6
3	10,09	17,4	21,1
4	8,77	15,6	19,3
5	7,76	14,3	17,9
6	6,95	13,2	16,7
7	6,30	12,3	15,8
8	5,76	11,6	15,0
9	5,31	11,0	14,3
10	4,92	10,4	13,8

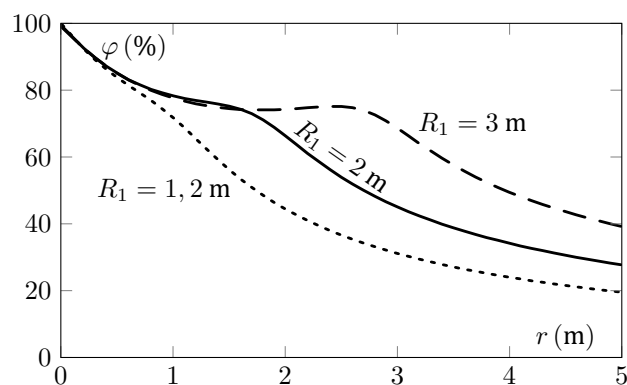
Табела 5.7. Карактеристики на едноконтурните комбинирани заземјувачи од фамилијата K2 и K2L2

заземјувач тип K2				заземјувач тип K2L2×l			
R_2 (m)	R_Z (Ω)	$E_{d.max}$ (%)	$E_{c.max}$ (%)	l (m)	R_Z (Ω)	$E_{d.max}$ (%)	$E_{c.max}$ (%)
2,2	10,50	14,4	20,4	2	9,49	12,9	19,8
2,7	9,18	14,1	18,1	3	8,88	12,4	19,3
3,2	8,16	14,3	16,8	4	8,30	12,0	18,9
3,7	7,34	14,5	16,0	5	7,78	11,6	18,6
4,2	6,68	14,7	15,9	6	7,31	11,3	18,2
4,7	6,14	14,9	15,8	7	6,88	11,0	17,9
5,2	5,68	15,0	15,8	8	6,50	10,8	17,6
5,7	5,29	15,2	15,8	9	6,16	10,6	17,3
6,2	4,96	15,3	15,8	10	5,86	10,4	17,1
6,7	4,66	15,5	15,9				

Табела 5.8. Карактеристики на едноконтурните комбинирани заземјувачи од фамилијата K2L4

заземјувач тип K2L4 × L			
l (m)	\Re_Z (Ω)	$E_{d,max}$ (%)	$E_{c,max}$ (%)
2	8,71	11,6	18,1
3	7,81	10,7	16,8
4	7,04	9,3	15,6
5	6,39	9,3	14,7
6	5,85	8,8	13,9
7	5,39	8,3	13,3
8	5,00	8,0	12,7
9	4,66	7,6	12,2
10	4,36	7,2	11,8

На сликата 5.24 е прикажана распределбата на потенцијалите по површината на земјата во било кој правец за три заземјувачи од фамилијата K1. Од неа се гледа, како што тоа впрочем може да се види и од табелата 5.5, дека од аспект на обликување на потенцијалот најповолно е контурата од заземјувачот тип K1 (или тип P1) да има радиус од околу $2 \div 3$ m, што е во спротивност со досега врежаната идеја и применуваната практика прстенот да се прави така што тој да биде оддалечен на растојание од околу 1 m од работ на столбот.



Слика 5.24. Распределба на потенцијалите по површината од земјата за заземјувачите од типот K1 со различни димензии на контурата

5.5.2 Фреквентни хистограми

Анализите коишто се вршени во рамките на некои испитувања покажуваат дека максималните потенцијални разлики на допир/чекор кај типските зракасти заземјувачи на столбовите во просек имаат вредности 20-30% од потенцијалот на столбот. Во ретки случаи, како на пример кај зракастиот заземјувач LT2 и L2, потенцијалната разлика на допир ја надминува вредноста од 30%, што е најлош случај.

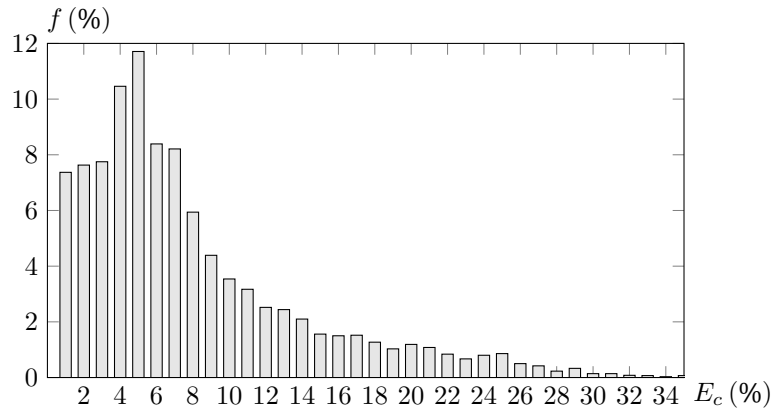
Кај прстенестите заземјувачи заради симетрија на заземјувачот максималните потенцијални разлики на допир се константни во сите правци со фреквенција на појавување 100 %. Тие, на пример, изнесуваат, во просек 31 % за едноконтурните заземјувачи од типот P1, односно 19 % за двоконтурните заземјувачи од типот P2, итн. Во поглед на максималните потенцијални разлики на чекор, од резултатите произлегува дека тие се секогаш помали од максималните потенцијални разлики на допир.

Дијаграмите на сликите 5.20÷5.23 овозможуваат, со соодветен избор на димензиите, да се избере заземјувач со отпорност на распростирање во дозволените граници согласно прописите. Вака избраниот заземјувач треба понатаму, во определени услови, да ги задоволи и критериумите за безбедност од превисоки потенцијални разлики на допир и чекор E_d, E_c , кои пак можат да се отчитаат од соодветните фреквентни хистограми. Последниве, пак, се добиваат со симулацијата монте карло (Monte Carlo) на случајните настани „допир на објектот“ (столбот) и „чекорење во близина на столбот„. Подетални информации за самата техника на добивање PDF-функциите (Probability Density Function) на густината на распределба на случајните величини E_d и E_c со примената на компјутерската симулација „монте карло“ може да е најдат во [20] и [21].

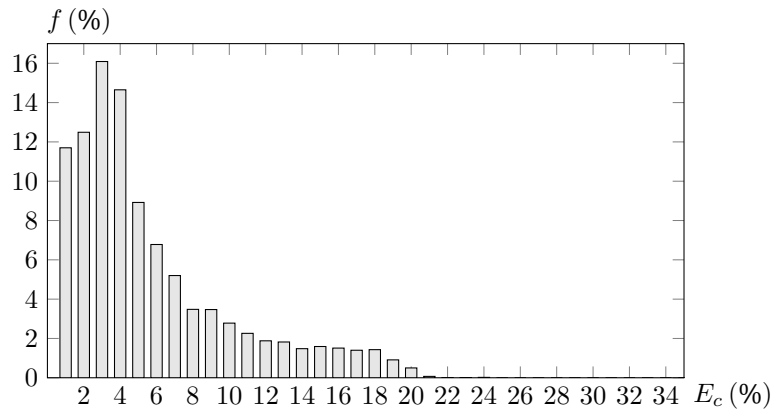
Фреквентниот хистограм на еден заземјувач дава многу поцелосна слика за неговите перформанси. Од него се отчитува не само максималната вредност $E_{d,max}$ односно $E_{c,max}$, на потенцијалните разлики на допир и чекор туку се оценува со колкава веројатност ќе се појавува некоја од вредностите на E_d односно E_c .

За илустрација, на сликите 5.25 и 5.26 се прикажани фреквентните хистограми на потенцијалните разлики на чекор кај прстенести заземјувачи од типот P1×1,5 ($R_1 = 1,5$ m) и P2×1,5 ($R_1 = 1,5$ m и $R_2 = 2,5$ m). Од хистограмите се гледа дека E_c достигнува вредности и до 30% но карактеристично е тоа што големите вредности имаат најмала фреквенција на појавување и се случуваат многу ретко. Со други зборови човек може да биде изложен на вакви максимални потенцијални разлики само во ретки случаи.

Во принцип колку еден фреквентен хистограм се наоѓа поналево, толку е обликувањето на потенцијалите во околината на заземјувачот направено поуспешно – и обратно. Поуспешно обликување на потенцијалите се добива со примена на заземјувачи со два прстена, со две контури или повеќе зраци.



Слика 5.25. Фреквентни хистограми на потенцијалните разлики на чекор кај прстенест заземјувач тип P1×1,5



Слика 5.26. Фреквентни хистограми на потенцијалните разлики на чекор кај прстенест заземјувач тип P2×1,5

Понекогаш е доволно наместо да се цртаат фреквентните хистограми на еден заземјувач се практикува табеларно да се дадат максималната (max), средната т.е. просечната (med) и минималната (min) вредност на соодветните потенцијални разлики. Овие 3 податоци заедно со константата на заземјувачот, односно податокот за R_Z ,

целосно го опишуваат самиот заземјувач. На овој начин во табела 5.9 се опишани два типа заземјувачи на столбови на 110 kV, типовите А 6,0 (со растојание меѓу стопите $S = 6$ m) и В 6,0 ($S = 6$ m, $D_B = 8$ m).

Табела 5.9. Основни карактеристики на заземјувачите тип А 6,0 и тип В 6,0

Тип	$R_Z (\Omega)$	E_d (%)			E_c (%)		
		max	med	min	max	med	min
А 6,0	4,583	24,23	15,84	12,14	17	2,84	0
В 6,0	3,904	13,47	9,36	7,08	13	2,62	0

5.5.3 Карактеристики на типските заземјувачи за 110 kV столбови

Во нашата практика заземјувачите на столбовите за висок и највисок напон ($U_n \geq 110$ kV) се изведуваат според изложеното во претходниот дел. Столбовите од високонапонските водови најчесто имаат четири расчленети темели – по еден за секоја нога (слика 5.14 и слика 5.15). Околу секоја стопа се изведуваат по два правоагли прстена (слика 5.15) и на тој начин се добива основната конфигурација на заземјувачот, означена како заземјувач тип А. Кога условите за безопасност тоа го бараат (населено место, близина на пат и слично), тогаш на конфигурацијата А (слика 5.16), околу сите четири стопи, се додава уште една правоаголна контура (слика 5.17) и на тој начин се добива заземјувачот тип В.

Со додавање на хоризонтални краци (по два или по четири) на основните конфигурации А и В се добиваат 4 фамилии типски заземјувачи: $A2 \times l$, $A4 \times l$, $B2 \times l$ и $B4 \times l$. (слика 5.18 и слика 5.19). Хоризонталните краци ја намалуваат отпорноста на распростирање R_Z на столбот. Се додаваат во услови кога столбот се наоѓа на терен со висока специфична отпорност ρ и е истовремено прилично изложен на директни атмосферски празнења.

Во натамошниот дел ќе бидат прикажани основните карактеристики на вкупно $2 \times 8 = 16$ различни типови заземјувачи за 110 kV надземни водови. Заедничко за сите од разгледуваните заземјувачи е тоа што околу секоја од четирите стопи на темелот, се поставуваат по два прстена (контури) во форма на квадрат со страница $a = 1,4$ m. Првиот прстен е предвиден да се постави на длабочина од 0,5 m, додека вториот, на потребната длабочина, во склад со длабочината на стопата, која кај носечките столбови во просек изнесува 2,5 m.

Освен прстените, поставени околу секоја стопа, кај мнозинството од избраните типски заземјувачи е предвидено и дополнително поставување на хоризонтални краци кои се закопуваат на длабочина од 0,8 m. Тие ќе имаат променлива должина: 5, 10, 15, ..., 40 m, зависно од специфичната отпорност на тлото во кое се поставува заземјувачот и големината на отпорноста на распростирање што сакаме да го постигнеме.

Заземјувачите од фамилијата В покрај прстените, поставени околу секоја стопа, имаат уште еден дополнителен прстен (контура) на длабочина од 0,8 m, со кој се опфатени сите 4 стопи од темелот. Овој прстен исто така има форма на квадрат со променлива страница D_B , а неговата димензија зависи од меѓусебното растојание на стопите, т.е. повторно зависи од височината на столбот и носивоста на тлото. Се поставува така што ќе се наоѓа на хоризонтална оддалеченост 1 m од страниците на столбот. Пресметките на карактеристиките на заземјувачите од фамилиите А и В, прикажани во табелите 5.10 и 5.11 се вршени за просечна вредност на растојанието помеѓу стопите $S = 4$ m ($D_B = 6$ m).

И кај заземјувачите на столбовите за висок и највисок напон ($U_n \geq 110$ kV), слично како и кај претходните заземјувачи, се врши „типизација“. Секој тип заземјувач има своја ознака и свои карактеристики. Првите 16 типови заземјувачи се без заеднички правоаголен прстен околу стопите на столбот, и тие во својата ознака започнуваат со буквата А. Вторите 16 типови заземјувачи имаат заеднички правоаголен прстен во форма на квадрат со страница D_B (табелите 5.10 и 5.11 се однесуваат на случајот $D_B = 6$ m), закопан на длабочина 0,8 m. Во својата ознака, тие започнуваат со латиничната буква В и се наменети за оние столбни места кај кои луѓето (или животните) имаат лесен пристап (близина на пат, населено место и сл). Со вметнувањето на заедничкиот прстен околу сите 4 стопи се врши незначително намалување на отпорноста на распростирање на заземјувачот, но прстенот се поставува заради обликување на потенцијалот во околината на столбот, со цел да се намали ризикот од појава на преголеми напони на чекор односно допир при појава на куси врски на водот³.

Од заземјувачите од типот А и В се развиени повеќе поттипови. Секој од поттиповите има по два или по четири дополнителни хоризонтални краци, со определена должина l , закопани на длабочина $h_l = 0,8$ m.

³Во некои случаи, кога столбот се наоѓа во непосредна близина на пат, населено место и слично, во согласност со одредбите од Правилникот [13] е неопходно да се изврши обликување на потенцијалот со поставување на дополнителен заеднички прстен околу сите четири стопи. Тогаш, на таквото столбно место е неопходно да се примени еден од облиците на заземјувачи кои припаѓаат на фамилијата В.

Должината l на секој од краците може да изнесува 5, 10, 15, ..., 40 m. Така, на пример, ознаката A2×15 кажува дека се работи за заземјувач од типот А кој има уште два дополнителни хоризонтални крака и притоа секој има должина од по 15 метри (слика 5.18), додека ознаката B4×10 кажува дека се работи за заземјувач од типот В кој покрај заедничкиот прстен околу сите четири стопи има уште четири дополнителни хоризонтални краци, секој со должина од по 10 m (слика 5.19).

Основните карактеристики на разгледуваните типски заземјувачи се прикажани во табелите 5.10 и 5.11. Во нив се прикажани следните величини: отпорноста на распростирање на заземјувачот (R_Z) во услови кога е тој поставен во хомогено тло со специфична отпорност $\rho = 100 \Omega\text{m}$, процентуалното учество на хоризонталните ленти I_L (%) во одведувањето на струјата во земја, процентуалното учество во одведувањето на струјата на стопите и прстените од основниот заземјувач I_S (%), вкупната должина на валчестото поцинкувано железо $\Phi 10$ од кое е формиран разгледуваниот заземјувач L_Σ (m) и вкупното количество земја (ископ) Q (m³) што треба да се ископа за да се изведе заземјувачот. При определувањето на ископот Q се претпоставило дека ровот во кој ќе се поставуваат хоризонталните краци l и заедничкиот прстен (кај заземјувачите од фамилијата В), има форма на паралелопипед со висина 0,8 m, ширина 0,4 m и должина l – респективно. При пресметувањето на цените за изведба на одделните типови заземјувачи се користени податоците за вообичаените единечните цени за ископот, лентите, бентонитот и градежните работи и друго.

Табела 5.10. Карактеристики на заземјувачите од фамилијата А

број	тип	$R_Z(\Omega)$	$I_L(\%)$	$I_S(\%)$	$L_\Sigma(\text{m})$	$Q(\text{m}^3)$	$C(\text{€})$
1	A	6,50	/	100,0	/	/	115
2	A210	4,86	42,2	57,8	24,40	6,85	200
3	A215	4,11	54,6	45,4	34,40	10,05	285
4	A220	3,54	62,8	37,2	44,40	13,25	370
5	A225	3,11	68,6	31,4	54,40	16,45	455
6	A230	2,78	72,8	27,2	64,40	19,65	540
7	A235	2,51	76,2	23,8	74,40	22,85	625
8	A240	2,29	78,8	21,2	84,40	26,05	710
9	A405	5,35	39,8	60,2	28,80	7,30	220

Табела 5.10. Карактеристики на заземјувачите од фамилијата А

број	тип	$R_Z(\Omega)$	$I_L(\%)$	$I_S(\%)$	$L_\Sigma(\text{m})$	$Q(\text{m}^3)$	$C(\text{€})$
10	A410	4,04	64,0	36,0	48,80	13,70	390
11	A415	3,20	75,8	24,2	68,80	20,10	560
12	A420	2,63	82,4	17,6	88,80	26,50	730
13	A425	2,24	86,6	13,4	108,80	32,90	900
14	A430	1,95	89,4	10,6	128,80	39,30	1070
15	A435	1,73	91,2	8,8	148,80	45,70	1235
16	A440	1,56	92,6	7,4	168,80	52,10	1405

Табела 5.11. Карактеристики на заземјувачите од фамилијата В

број	тип	$R_Z(\Omega)$	$I_L(\%)$	$I_S(\%)$	$L_\Sigma(\text{m})$	$Q(\text{m}^3)$	$C(\text{€})$
1	B	5,97	/	70,8	32	10,2	200
2	B210	4,70	38,6	44,8	56	17,3	285
3	B215	4,01	51,4	35,6	66	20,5	370
4	B220	3,47	60,2	29,2	76	23,7	455
5	B225	3,06	66,2	24,2	86	26,9	540
6	B230	2,74	70,8	21,6	96	30,1	625
7	B235	2,48	74,4	18,8	106	33,4	710
8	B240	2,26	77,0	16,6	116	36,5	795
9	B405	5,19	34,6	48,4	60	18,6	310
10	B410	3,99	60,8	29,8	80	25,0	480
11	B415	3,18	73,6	20,4	100	31,4	650
12	B420	2,62	81,0	14,8	120	37,8	820
13	B425	2,24	85,4	11,0	140	44,2	990
14	B430	1,95	88,6	8,5	160	50,6	1160
15	B435	1,73	90,6	7,2	180	57,0	1325
16	B440	1,56	92,2	6,2	200	63,4	1600

5.6 Ударна отпорност на распростирање на заземјувачите

Првенствена задача на заземјувачите од столбовите на надземните водови е заштита од атмосферските пренапони. Затоа мерка за перформансите на ваквите заземјувачи е нивната импулсна отпорност R_i , која се нарекува и ударна импеданција. Таа се дефинира како однос помеѓу максималната вредност на импулсниот напон на заземјувачот U_m и максималната вредност на импулсната струја I_m која го предизвикала тој напон. Ударната импеданција е пропорционална на отпорноста на распростирање на заземјувачот мерена со наизменична струја со индустриска фреквенција R_Z , т.е.

$$R_i = \alpha \cdot R_Z. \quad (5.3)$$

Факторот на пропорционалност α , којшто се нарекува „импулсен коефициент“, има поголеми вредности кај подолгите заземјувачи, поголемите струи и поголемите специфични отпорности на тлото. Кај таквите заземјувачи преовладува нивната индуктивност која за стрмни струјни импулси ја зголемува ударната импеданција на заземјувачот.

Заземјувачите од столбовите на надземните водови за среден напон (10, 20 и 35 kV) па дури и заземјувачите на 110 kV надземни водови кои се без дополнителни хоризонтални краци се по димензии мали и кај нив индуктивноста има незначително влијание врз импулсниот коефициент така што може, без голема грешка, да се земе дека е $\alpha \approx 1$, т.е. $R_i \approx R_Z$. Но кај пространите заземјувачи, особено оние со долги хоризонтални зраци тоа не е можно.

5.6.1 Импулсни коефициенти на долгите хоризонтални заземјувачи

Во почвите со висока специфична отпорност ρ тешко се постигнува мала отпорност на заземјувачите со стандардни, т.е. вообичаени димензии. Затоа, во тие случаи, се применуваат долги хоризонтални заземјувачи во форма на ленти (траки). Еден таков заземјувач можеме да го замислиме како вод со рамномерно распределени параметри и процесите што се одвиваат кај него во импулсниот период да ги третираме како бранови процеси на вод. Таквиот вод има свои подолжни параметри: надолжна активна отпорност R_1 , надолжна индуктивност L_1 , надолжна капацитивност C_1 и надолжна одводност (кондуктација) G_1 . Неговата бранова импеданција Z_C и брзината на простирање на брановите по него, v , се пресметуваат слично како и во случајот со надземен вод, со помош на следните изрази

$$Z_C = 60 \cdot \ln \frac{2l}{d} (\Omega),$$

$$v = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon\mu}} = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_r\mu_r}} \cdot \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0\mu_0}} = \frac{v_0}{\sqrt{\varepsilon_r\mu_r}}, \quad v_0 = 3 \cdot 10^8 \left(\frac{\text{m}}{\text{s}}\right), \quad (5.4)$$

во кои со l и d се означени должината и пречникот на заземјувачот.

Почвата во која што се наоѓа заземјувачот, како и секој друг медиум, има своја специфична отпорност ρ , диелектрична константа $\varepsilon = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r$ и магнетска пермиабилност μ . Специфичната отпорност ρ зависи од типот на почвата и се менува од неколку десетини Ωm до неколку илјади Ωm . Магнетската пермиабилност μ на земјата е приближно еднаква на онаа на воздухот, т.е. $\mu = \mu_0\mu_r \approx \mu_0$ ($\mu_r = 1$), додека релативната диелектрична константа ε_r на тлото силно зависи од неговата влажност и варира од $\varepsilon_r = 1$ за сосема суви почви до $\varepsilon_r = 80$ за почви целосно заситени со вода.

Подолжниот параметар R_1 , како малку влијателен, може слободно да се занемари. Останатите подолжни параметри на заземјувачот L_1 , C_1 и G_1 се пресметуваат со помош на следните формули

$$L_1 = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \ln \frac{2l}{d}, \quad \left(\frac{\text{H}}{\text{m}}\right),$$

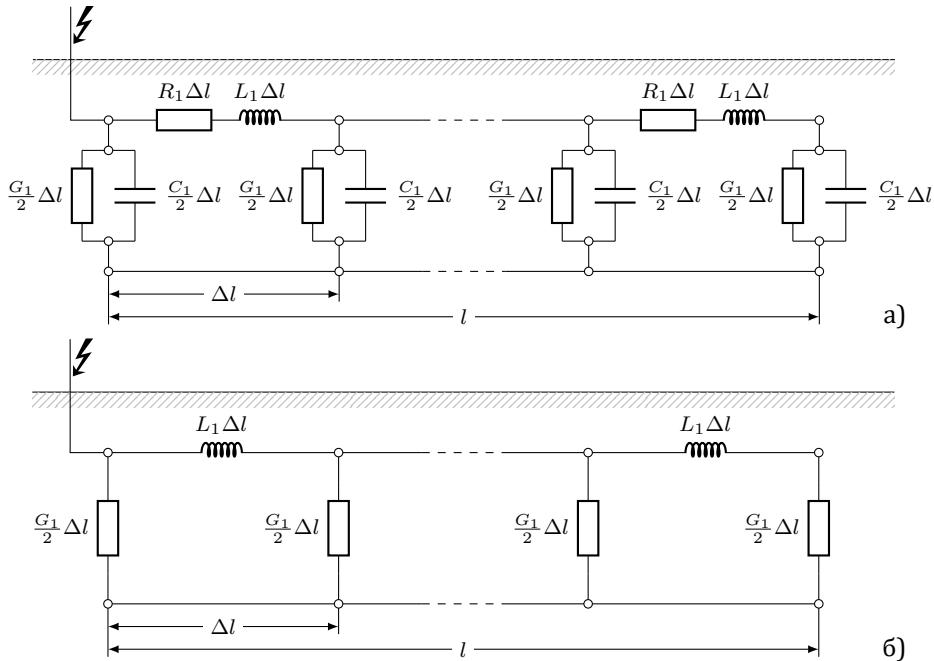
$$C_1 = \frac{2\pi\varepsilon_0\varepsilon_r}{\ln \frac{2l}{d}}, \quad \left(\frac{\text{F}}{\text{m}}\right), \quad (5.5)$$

$$G_1 = \frac{\pi}{\rho \ln \frac{l}{\sqrt{d \cdot h}}}, \quad \left(\frac{\text{S}}{\text{m}}\right).$$

Во согласност со теоријата на водовите, на секој еден таков заземјувач по којшто протекува струјата на громот му припаѓа соодветен „повратен спроводник“, поставен на определено растојание, паралелно со заземјувачот. Еквивалентата шема на еден таков заземјувач со должина l може да се претстави со една верига (ланец) од четворополи, како што е тоа прикажано на сликата 5.27а. Притоа секој од концентрираните четворополи заменува парче од заземјувачот со должина Δl .

Ако редната отпорност $R_1\Delta l$ како и напречната капацитивност $C_1\Delta l/2$ ги испуштиме од шемата на сликата 5.27, како малку влијателни во однос влианието на индуктивноста $L_1\Delta l$ и активната одводност $G_1\Delta l$ врз простирањето на струјните и напонски бранови, тогаш ќе ја добиеме

упростената заменска шема од слика 5.27б. На тој начин процесите во долгите заземјувачи се решаваат на многу поедноставен начин без притоа да се изгуби во точноста во поголема мера.



Слика 5.27. Долг хоризонтален заземјувач и негова приближна претстава

Да опишеме сега што се случува кога струјниот импулс на громот со голема стрмнина се втиснува во еден ваков заземјувач. На челото на струјниот бран, кога промената на струјата е голема, индуктивноста на заземјувачот, која што е физички сврзана со создавањето на магнетскиот флуks во просторот околу заземјувачот, го спречува рамномерното истекување на струјата од заземјувачот во околната почва по целата негова должина. Затоа струјата е принудена да се одведува во земјата само од првите неколку метри на заземјувачот. Значи, индуктивноста на заземјувачот, која не дозволува да се активира целата негова должина, всушност се спротивставува на напредувањето на струјата по неговата должина, т.е. ја зголемува неговата отпорност на распростирање.

Разликата помеѓу импулсната (ударната) отпорност на распростирање R_i и неговата отпорност R_z со која што тој се спротивставува на обичните наизменични струи 50 Hz, многу зависи од стрмнината на струјата на громот $S = di/dt$. Струите на громот со поголема стрмнина потешко ќе продираат во заземјувачот бидејќи тогаш неговата индуктивна отпорност доаѓа повеќе до израз. Колку е

стрмината S поголема, односно времето на чело на струјниот импулс T_c покус, толку ќе биде потребно подолго време да измине за струјата да продре по целата должина на заземјувачот. Значи индуктивноста на заземјувачот оневозможува, барем додека трае челото на импулсот, целата должина на заземјувачот да учествува во одведувањето на струјата на громот.

Од изложеното произлегува заклучокот дека при одведувањето на струјата на громот во земјата не учествува секогаш целата должина на заземјувачот туку само еден негов дел. Затоа и импулсната отпорност на распростирање R_i е поголема од конвенционалната вредност на отпорноста R_Z . Подоцна ќе видиме дека при одведувањето на големите струи на громот во земјата, поради процесите на искрење и пробив на земјиштето околу заземјувачот, врз вредноста R_i влијае уште и големината на струјата на громот.

За да ја пресметаме импулсната отпорност на распростирање R_i ќе биде потребно да ја пресметаме т.н. „активна должина“ на заземјувачот l_a . Неа ја добиваме со помош на изразот

$$l_a = \sqrt{\frac{T_c}{G_1 \cdot L_1}} \quad (\text{m}) \quad (5.6)$$

Со помош на овој израз е можно да се оцени дали за време на челото еден долг заземјувач со дадена должина l ќе ја одведува струјата на громот во земјата со целата своја должина или пак тоа ќе го прави само со еден нејзин дел l_a , што ќе доведе до зголемување на зголемување на импулсната отпорност на распростирање. Значи, доколку е $l > l_a$, тогаш во импулсниот период на челото заземјувачот ќе учествува во одведувањето на струјата само со својата активна должина l_a . Обратно, доколку е $l < l_a$, тогаш заземјувачот за целото време ќе дејствува со својата вкупна должина и тогаш ќе биде $R_i = R_Z$.

Пресметувањето на големината на ударната отпорност R_i го олеснува фактот што надолжната индуктивност на заземјувачот L_1 за заземјувачите во сите видови земја е практично константна и се менува во многу тесен интервал, во границите од 1 до 2 $\mu\text{H/m}$. Затоа ударната отпорност R_Z може да се пресмета само како функција од вкупната конвенционална одводност на заземјувачот $G = G_1 \cdot l$ и времето на чело T_c (т.е. стрмината $S = di/dt$). Нејзината приближна вредност може да се добие со помош на следниот израз

$$R_i = \begin{cases} \frac{1}{G_1 \cdot l} & \text{за } T_c > 1,49 \cdot G_1 \cdot l^2, \\ \frac{1,21}{\sqrt{G_1 \cdot T_c}} & \text{за } T_c \leq 1,49 \cdot G_1 \cdot l^2, \end{cases} \quad (5.7)$$

Значи големината на ударната отпорност на распростирање R_i зависи од параметрите на заземјувачот G_1 и l , но зависи и од должината на челото на струјниот бран. Кога сакаме да ги земеме најнеповолните околности што можат да се јават во стварноста најчесто усвојуваме $T_c = 1 \mu\text{s}$ и со оваа вредност ја определуваме ударната отпорност на распростирање R_i на заземјувачот.

Пример 5.1. Поцинкувана челична лента FeZn 30x4 со должина $l = 10 \text{ m}$ е закопана на длабочина $h = 0,7 \text{ m}$ во хомогено тло со специфична отпорност $\rho = 100 \Omega\text{m}$. Да се пресмета конвенционалната отпорност на распростирање R_Z и ударната отпорност R_i за случајот кога струјниот импулс на громот има стандарден облик 1,2/50 и амплитуда $I_M = 25 \text{ kA}$. Колкав е импулсниот коефициент α на заземјувачот. Колкава ќе биде амплитудата на напонот на заземјувачот U_M . Пресметките да се повторат и за случајот кога должината на лентата изнесува $l = 20 \text{ m}$.

Решение

Отпорноста на распростирање за струја 50 Hz изнесува

$$R_Z = \frac{\rho}{\pi \cdot l} \cdot \ln \frac{l}{\sqrt{h \cdot d}} = \frac{100}{\pi \cdot 10} \cdot \ln \frac{10}{\sqrt{0,7 \cdot 0,02165}} = 14 \Omega,$$

каде што е $d = 2 \cdot (30 + 4)/\pi = 68/\pi = 21,65 \text{ mm} = 0,02165 \text{ m}$.

Единичната одводност на заземјувачот G_1 и единичната индуктивност L_1 ќе бидат

$$G_1 = \frac{1}{R_Z \cdot l} = \frac{1}{14 \cdot 10} = 0,007144 \frac{\text{S}}{\text{m}},$$

$$L_1 = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \ln \frac{2l}{d} = \frac{4\pi \cdot 10^{-7}}{2\pi} \cdot \ln \frac{2 \cdot 10}{21,65 \cdot 10^{-3}} = 1,366 \frac{\mu\text{H}}{\text{m}}.$$

Активната должина на заземјувачот l_a за овој струен импулс ќе биде

$$l_a = \sqrt{\frac{T_c}{G_1 \cdot L_1}} = \sqrt{\frac{1,2}{0,007144 \cdot 1,366}} = 11,09 \text{ m} \approx l.$$

Бидејќи е $1,49 \cdot G_1 \cdot l^2 = 1,064 < T_c$, за импулсната отпорност на распростирање ќе добиеме

$$R_i = \frac{1}{G_1 \cdot l} = R_Z = 14 \Omega.$$

Значи импулсниот коефициент во случајов ќе биде $\alpha = 1$.

Амплитудата на напонот на заземјувачот U_M ќе ја добиеме како производ од неговата импулсна отпорност и темената вредност на струјата I_M

$$U_M = R_i \cdot I_M = 14 \cdot 25 = 350 \text{ kV}.$$

Во случајот кога должината на лентата изнесува $l = 20 \text{ m}$ ќе имаме

$$R_Z = \frac{\rho}{\pi \cdot l} \cdot \ln \frac{l}{\sqrt{h \cdot d}} = \frac{100}{\pi \cdot 20} \cdot \ln \frac{20}{\sqrt{0,7 \cdot 0,02165}} = 8,1 \Omega.$$

$$G_1 = \frac{1}{R_Z \cdot l} = \frac{1}{8,1 \cdot 20} = 0,006171 \frac{\text{S}}{\text{m}}$$

$$L_1 = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \ln \frac{2l}{d} = \frac{4\pi \cdot 10^{-7}}{2\pi} \cdot \ln \frac{2 \cdot 20}{21,65 \cdot 10^{-3}} = 1,504 \frac{\mu\text{H}}{\text{m}}$$

$$l_a = \sqrt{\frac{T_c}{G_1 \cdot L_1}} = \sqrt{\frac{1,2}{0,006171 \cdot 1,504}} = 11,37 \text{ m} < l.$$

Бидејќи во овој случај $1,49 \cdot G_1 \cdot l^2 = 3,67 > T_c$ импулсната отпорност на заземјувачот ќе биде

$$R_i = \frac{1,21}{\sqrt{G_1 \cdot T_c}} = \frac{1,21}{\sqrt{0,006171 \cdot 1,2}} = 14 \Omega \approx 1,75 \cdot R_Z.$$

Значи, сега, кога вистинската должина на заземјувачот е поголема од тнр. активна должина ($l > l_a$) неговата импулсна отпорност R_i ќе биде поголема од отпорноста за наизменична струја R_Z за 1,75 пати. Значи ударниот коефициент во случајов ќе изнесува $\alpha = 1,75$.

Амплитудата на напонот на заземјувачот U_M во овој случај ќе биде

$$U_M = R_i \cdot I_M = 14 \cdot 25 = 350 \text{ kV},$$

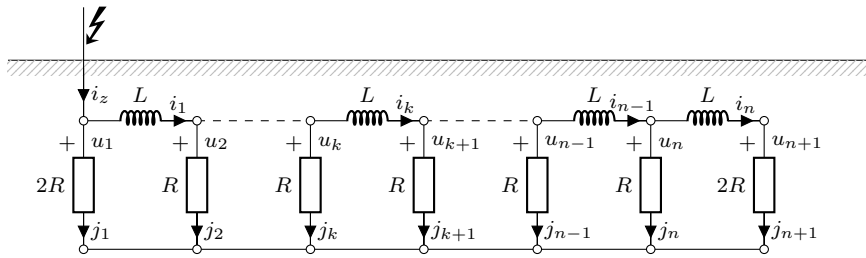
што е истата вредност што се постигнува кај претходниот заземјувач со должина $l = 10 \text{ m}$. Овој резултат само го потврдува фактот дека во импулсниот режим заземјувачите учествуваат во одведувањето на струјата на громот само со својата активна должина. Затоа во ваквите случаи, кога вистинската должина на заземјувачот е поголема од активната, пресметките на импулсните пренапони и димензионирањето на самите заземјувачи се вршат со ударната отпорност R_i .

□ □ □

Пример 5.2. За случајот со $l = 20 \text{ m}$ од примерот 5.1 да се изврши компјутерска симулација на простирањето на бранот по лентата. При тоа, лентата да се подели на $n = 40$ делови, секој со должина од $0,5 \text{ m}$ и да се користи шемата од сликата П.5.2.1 која произлегува од шемата на сликата 5.27б. Параметрите на еквивалентната шема се

$$R = \frac{1}{G_1 \cdot l/n} = \frac{1}{0,006171 \cdot 20/40} = 324,1 \Omega;$$

$$L = L_1 \cdot l/n = 1,504 \cdot 20/40 = 0,752 \mu\text{H}.$$



Слика П.5.2.1

Струјниот импулс кој се инјектира на почетокот од лентата е со следниот облик

$$i_z(t) = \frac{I_m}{k} \cdot (e^{-at} - e^{-bt}),$$

каде што I_m е максималната вредност на струјата, а коефициентот k е максимумот на двојно-експоненцијалната функција во заградата и тој изнесува

$$k = \left(\frac{a}{b}\right) \frac{-a}{a-b} - \left(\frac{a}{b}\right) \frac{-b}{a-b}.$$

Коефициентите a и b се поврзани со времето на траење на челото T_c и грбот T_g

$$a = \frac{0,69}{T_g}, \quad b = \frac{3,24}{T_c}.$$

Ваков струен импулс можеме да добиеме со следната функција

**Програма 5.1. Двојно експоненцијален импулс
(programi/impuls/impuls.m)**

```

1 function i = impuls(t,Im,Tc,Tg)
2 a = 0.69/Tg; b = 3.24/Tc;
3 k = (a/b)^(-a/(a-b)) - (a/b)^(-b/(a-b));
4 i = Im/k*(exp(-a*t) - exp(-b*t));

```

при што треба да зададеме $I_m = 25$ kA, $T_c = 1,2$ μ s и $T_g = 50$ μ s.

Решение

Бидејќи колото од сликата П.5.2.1 треба да го решаваме во временски домен, за да ја добиеме промената на струјата и напонот на сите негови елементи, ќе биде потребно да користиме диференцијални равенки.

Во електроенергетските системи решенијата на диференцијалните равенки, се функции со кои што е дадена временската промена на одредена големина како што е напон, струја, агол на роторот на генератор итн. Егзактното решавање на диференцијалните равенки, кон кое секогаш се тежнее во математиката, ги дава овие функции во аналитички облик, односно дава сложени изрази од независната

променлива (време) со која што е опишана промената на одредена величина.

Инженерскиот пристап кон добивањето на решението ќе биде поинаков затоа што нас ни е сосема доволно да го познаваме решението дадено во нумерички облик од кој што можеме да ги извлечеме сите потребни заклучоци. Нумеричкото решение е дадено во вектори кои што содржат нумерички вредности на функциите кои што ги бараме за одредени вредности на независната променлива (одредени временски моменти). Од тие вектори можеме да заклучиме дали одредена величина (напон, струја, агол, итн.) има осцилаторна или апериодична промена, дали нејзината максимална вредност претставува опасност за некоја опрема или уред (пренапони или ударни струи), дали одреден систем е стабилен итн.

Во Matlab постојат повеќе методи за нумеричко решавање на системи диференцијани равенки од прв ред како што се `ode23`, `ode45`, `ode113`, `ode15s`, `ode23s`, `ode23t` и `ode23tb`. Тука, прво преку едноставен пример, ќе ја разгледаме нивната примена за решавање на системи диференцијални равенки од прв ред од следниот облик

$$\begin{aligned}\frac{dx_1}{dt} &= f_1(t, x_1, x_2, \dots, x_n), \\ \frac{dx_2}{dt} &= f_2(t, x_1, x_2, \dots, x_n), \\ &\vdots \\ \frac{dx_n}{dt} &= f_n(t, x_1, x_2, \dots, x_n),\end{aligned}$$

од каде што се забележува дека диференцијалните равенки треба да бидат напишани на таков начин што од левата страна ќе бидат дадени првите изводи на зависните променливи x_1, x_2, \dots, x_n , додека од десната страна може да има изрази (функции) од произволен облик (не само линеарен) кој што може да ги содржи сите зависни променливи како и за независната променлива t .

Ќе го разгледаме следниот едноставен систем од 2 диференцијални равенки од прв ред

$$\begin{aligned}\frac{dx_1}{dt} &= 2 \cdot x_1 - 0,001 \cdot x_1 \cdot x_2, \\ \frac{dx_2}{dt} &= -10 \cdot x_2 + 0,002 \cdot x_1 \cdot x_2,\end{aligned}$$

со почетни услови $x_1(0) = 5000$ и $x_2(0) = 100$.

Ќе ги определиме функциите $x_1(t)$ и $x_2(t)$, како и нивните максимални вредности.⁴

Прво пишуваме функција која враќа вектор чии елементи се десните страни од диференцијалните равенки

programi/impuls/izvodi.m

```
1 function dx = izvodi(t,x)
2 dx(1,1) = 2*x(1) - 0.001*x(1)*x(2);
3 dx(2,1) = -10*x(2) + 0.002*x(1)*x(2);
```

а потоа ја повикуваме функцијата ode23t во која прв параметар е името на функцијата со изводите, потоа следува вектор со интервал за t за кој сакаме да ја добиеме промената на функциите x_1 и x_2 и на крајот следува вектор со почетни вредности за функциите.

programi/impuls/dif_rav.m

```
1 [t, x] = ode23t('izvodi',[0 5],[5000 100]);
2 plot(t,x);
3 xmax = max(x)
```

Со тоа, освен граfiците $x_1(t)$ и $x_2(t)$, го добиваме следното решение

```
>> dif_rav
xmax =
  1.0e+04 *
  1.0946    0.9062
```

За да го решиме колото од сликата П.5.2.1 треба да напишеме систем од $n = 40$ диференцијални равенки од прв ред колкав што е и бројот на индуктивни елементи во него. При тоа, одбираме независни променливи да бидат струите во индуктивните елементи за кои имаме нулти почетни услови.

Според нумерацијата во колото, индуктивниот елемент со реден број k е поврзан помеѓу јазлите k и $k + 1$. Според тоа ќе важат следните равенки

$$L \frac{di_k}{dt} = u_k - u_{k+1}, \quad k = 1, 2, \dots, n, \quad (\text{П.5.2.1})$$

каде што со u_k и u_{k+1} се означени потенцијалите на јазлите k и $k + 1$. Овие потенцијали можеме да ги изразиме преку струите во напречните отпорници со што добиваме

$$u_k = \begin{cases} 2R \cdot j_1 & k = 1, \\ R \cdot j_k & 2 \leq k \leq n, \\ 2R \cdot j_{n+1} & k = n + 1. \end{cases} \quad (\text{П.5.2.2})$$

⁴ Дадениот систем равенки го опишува проблемот на грабливец и плен, на пример лисици и зајаци. Тука бројот на зајаци е означен со x_1 , а бројот на лисици со x_2 .

а понатаму применувајќи го Кирхофовиот закон за струи за сите јазли струите во напречните отпорници можеме да ги изразиме преку струите во калемите на следниот начин

$$j_k = \begin{cases} i_z - i_1 & k = 1, \\ i_{k-1} - i_k & 2 \leq k \leq n, \\ i_n & k = n + 1. \end{cases} \quad (\text{П.5.2.3})$$

Користејќи ги (П.5.2.2) и (П.5.2.3) за разликата на потенцијали на десната страна од (П.5.2.1) имаме

$$\begin{aligned} u_1 - u_2 &= 2R \cdot j_1 - R \cdot j_2 = 2R \cdot (i_z - i_1) - R \cdot (i_1 - i_2) = \\ &= R \cdot (2i_z - 3i_1 + i_2), \\ u_k - u_{k+1} &= R \cdot j_k - R \cdot j_{k+1} = R \cdot (i_{k-1} - i_k) - R \cdot (i_k - i_{k+1}) = \\ &= R \cdot (i_{k-1} - 2i_k + i_{k+1}), \quad 2 \leq k \leq n - 1, \\ u_n - u_{n+1} &= R \cdot j_n - 2R \cdot j_{n+1} = R \cdot (i_{n-1} - i_n) - 2R \cdot i_n = \\ &= R \cdot (i_{n-1} - 3i_n), \end{aligned}$$

а потоа со замена во (П.5.2.1) за изводите на струите во калемите добиваме

$$\frac{di_k}{dt} = \begin{cases} R/L \cdot (2i_z - 3i_1 + i_2) & k = 1, \\ R/L \cdot (i_{k-1} - 2i_k + i_{k+1}) & 2 \leq k \leq n, \\ R/L \cdot (i_{n-1} - 3i_n) & k = n + 1. \end{cases} \quad (\text{П.5.2.4})$$

Функцијата во Matlab во која се напишани десните страни од горниот систем диференцијални равенки е `izvodi_vod`. Во неа за струјата i_z е користена функцијата `impuls`.

Програма 5.2. Изводи на струите во сегментите од лентата (programi/impuls/izvodi_vod.m)

```
1 function di = izvodi_vod(t,i,R,L,Im,Tc,Tg)
2 n = length(i);
3 di(1,1) = R/L * (2*impuls(t,Im,Tc,Tg) - 3*i(1) + i(2));
4 for k = 2:n-1
5     di(k,1) = R/L * (i(k-1) - 2*i(k) + i(k+1));
6 end
7 di(n,1) = R/L * (i(n-1) - 3*i(n));
```

Решавањето на системот од диференцијални равенки е направено со функцијата `lenta_impuls`. Таа ги има следните влезни параметри

- `rho` Специфична отпорност на земјата,
- `h, l` Длабочина на закопување и должина на лентата,
- `Im, Tc, Tg` Максимална вредност на струјата на струјниот импулс, времетраење на неговиот чело и грб,

t_{\max} Максимална вредност на променливата t за која сакаме да го добиеме решението.

додека како излез од функцијата се добиваат векторот t со вредности за променливата t и матриците i , j , u со n односно $n + 1$ колона во која се вредностите за сите струи и напони во колото.

Програма 5.3. Пресметка на струите и напоните по должина на лентата (programi/impuls/lenta_impuls.m)

```
1 function [t,i,j,u] = lenta_impuls(rho,h,l,Im,Tc,Tg,tmax)
2 d = 2*(30+4)/1000/pi;
3 Rz = rho/(pi*l) * log(l/sqrt(d*h))
4 G1 = 1/(Rz*l);
5 L1 = 2e-7*log(2*l/d);
6 n = l/0.5;
7 R = 1/(G1*l/n);
8 L = L1*l/n;
9 f = @(t,i) izvodi_vod(t,i,R,L,Im,Tc,Tg);
10 [t, i] = ode23t(f,[0 tmax],zeros(n,1));
11 j(:,1) = impuls(t,Im,Tc,Tg) - i(:,1);
12 for k = 2:n
13     j(:,k) = i(:,k-1) - i(:,k);
14 end
15 j(:,n+1) = i(:,n);
16 u = R*j;
17 u(:,[1 n+1]) = 2*u(:,[1 n+1]);
18 Ri = max(u(:,1))/Im
19 alfa = Ri/Rz
```

Функцијата `lenta_impuls` се состои од следните главни делови

- ① Пресметување на надолжните параметри на лентата и на еквивалентното коло.
- ② Дефинирање на имплицитна функција со изводите на струите и решавање на системот диференцијални равенки.
- ③ Пресметување на струите во напречните отпорници и нивните напони.
- ④ Пресметување на максималната вредност на напонот и импулсниот коефициент на заземјувачот.

Решението за конкретно зададените бројни вредности во примерот го добиваме со следната команда

```
>> [t,i,j,u] = lenta_impuls(100,0.7,20,25,1.2e-6,50e-6,5e-6);
Rz =
    8.1019
Ri =
   16.0341
alfa =
    1.9791
```

од каде што гледаме дека импулсниот коефициент на заземјувачот изнесува $\alpha = 1,9791$ што е различно од вредноста која ја добивме во претходниот пример затоа што таму работевме со приближни формули.

На крајот со програмата `lenta_impuls_crtaj` ќе нацртаме две зависимости: временска промена на напонот во сите точки од лентата (слика П.5.2.2) и просторна промена на напонот по должина на лентата во неколку одбрани временски моменти (слика П.5.2.3).

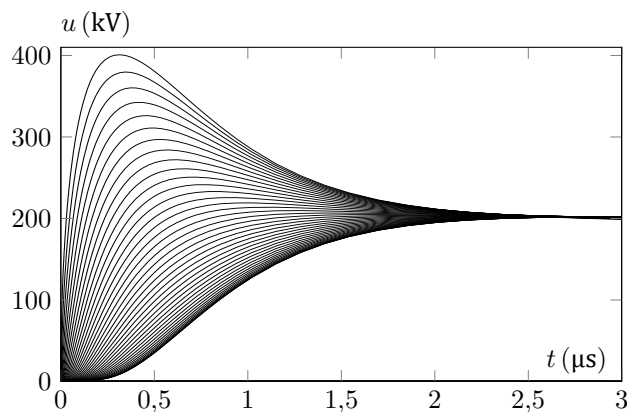
Програма 5.4. Цртање на напоните по должина на лентата (programi/impuls/lenta_impuls_crtaj.m)

```

1 [t,i,j,u] = lenta_impuls(100,0.7,20,25,1.2e-6,50e-6,10e-6);
2 plot(t,u); xlim([0 3e-6]); ylim([0 450])
3 t1 = [0.01 0.05 0.1 0.2 0.3]*1e-6;
4 k = [];
5 for m = 1:length(t1)
6     k = [k find(t > t1(m), 1)];
7 end
8 figure; plot(linspace(0,20,41),u(k,:))

```

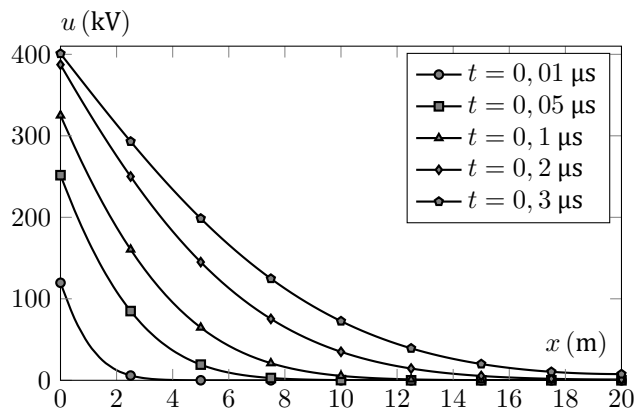
Во првиот случај цртаме вредности од сите колони на матрицата u со што добиваме 41 крива при што најгорната крива одговара на почетната точка од лентата, а најдолната крива на одговара на нејзината крајна точка. Од сликата се забележува дека во моменти кога потенцијалот на почетокот на лентата достигнал максимум на нејзиниот крај скоро и да нема потенцијал, додека на нејзината средина потенцијалот е околу 4 пати помал. Тоа значи дека од вториот дел од лентата истекува многу малку струја, односно тој дел на помага во одведувањето на струја во земјата и лентата се однесува како да има поголем отпор ($\alpha > 1$).



Слика П.5.2.2

Промената на потенцијалот по должина на лентата $u(x)$ е нацртан за временските моменти $t \in [0, 0.01 \ 0.05 \ 0.1 \ 0.2 \ 0.3] \mu s$ (слика П.5.2.3), при што во овој случај цртаме вредности од одредени редици на матрицата u . Редниот број на овие редици е одреден така што елементите од векторот t одговараат на петте зададени вредности за

t. Од сликата П.5.2.3 уште полесно доаѓаме до претходно наведените заклучоци. Како дополние на претходното тука можеме да видиме дека во моментот $t = 0,1 \mu\text{s}$, кога потенцијалот на почетокот на лентата достигнал 80% од максималната вредност, на растојанија $x > 10 \text{ m}$ од почетокот потенцијалот е практично еднаков на нула. Тоа значи дека од вториот дел на лентата воопшто не истекува струја, т.е. лентата се однесува како да го нема вториот дел, односно како да е два пати покуса. Поради тоа, импулсната отпорност на лентата е доста поголема од R_Z (скоро 2 пати).



Слика П.5.2.3. Распределба на напонот долж лентата $u(t)$ во разни моменти t



Пример 5.3. Заземјувач во форма на трикрака ѕвезда, составен од три поцинкувани челични ленти FeZn 30×4 , секоја со должина $l = 20 \text{ m}$, е закопан на длабочина $h = 0,7 \text{ m}$ во хомогено тло со специфична отпорност $\rho = 200 \Omega\text{m}$. Да се пресмета конвенционалната отпорност R_Z , а потоа и ударната отпорност R_i на распростирање на заземјувачот за случајот кога времето на чело изнесува $T_c = 1,2 \mu\text{s}$.

Решение

а) Пресметка на конвенционалната отпорност на заземјувачот

Отпорноста на распростирање на еден крак од заземјувачот R_{1l} ќе биде

$$R_{1l} = \frac{\rho}{\pi \cdot l} \cdot \ln \frac{l}{\sqrt{h \cdot d}} = \frac{200}{\pi \cdot 20} \cdot \ln \frac{20}{\sqrt{0,7 \cdot 0,022}} = 16,204 \Omega.$$

Приближната вредност на конвенционалната отпорност на распростирање на комплетниот заземјувач во форма на трикрака ѕвезда, за струја со фреквенција од 50 Hz, (видете ја задачата 5.1) изнесува

$$R_Z = \frac{\rho}{2\pi L_\Sigma} \cdot \left(\ln \frac{L_\Sigma^2}{d \cdot h} + A_k \right); \quad L_\Sigma = n \cdot l = 3 \cdot 20 = 60 \text{ m}; \quad A_k = 0,87;$$

$$R_Z = \frac{200}{2\pi \cdot 60} \cdot \left(\ln \frac{60^2}{0,022 \cdot 0,7} + 0,87 \right) = 7,028 \Omega.$$

Отпорноста R_Z во овој случај (на идеална симетрија на заземјувачот) може да се пресмета и на друг начин, со помош на следната формула

$$R_Z = \frac{1}{\eta} \cdot \frac{R_{1l}}{n},$$

од каде што за коефициентот на искористување на заземјувачот η , во овој случај, се добива

$$\eta = \frac{R_{1l}}{n \cdot R_Z} = \frac{16,204}{3 \cdot 7,028} = 0,768.$$

б) Пресметка на импулсната отпорност на заземјувачот

Импулсната отпорност на распростирање на еден крак од заземјувачот R_{1i} ќе се добие со наполно истата постапка како и во претходниот пример. На тој начин ќе добиеме

$$G_1 = 0,00386 \text{ S/m}; \quad L_1 = 1,562 \mu\text{H/km}; \quad l_a = 15,8 \text{ m} < l;$$

$$R_{1i} = \frac{1,21}{\sqrt{G_1 \cdot T_c}} = \frac{1,21}{\sqrt{0,00386 \cdot 1,2}} = 19,885 \Omega \approx 1,23 \cdot R_{1l} \Rightarrow \alpha_1 = 1,23.$$

Бидејќи коефициентот на искористување на заземјувачот η е приближно ист како за нормален режим ($f = 50 \text{ Hz}$) така и за импулсен режим, т.е. $\eta_i = \eta = 0,768$, тогаш следува дека и импулсниот коефициент α на целиот заземјувач ќе биде еднаков на коефициентот α_1 . На тој начин се добива

$$R_i = \alpha \cdot R_Z = 1,23 \cdot 7,028 = 8,625 \Omega.$$

□ □ □

Пример 5.4. Колкави ќе бидат отпорностите на распростирање R_Z и импулсниот коефициент R_i на заземјувачот во форма на трикрака ѕвезда од примерот 5.3 ($n = 3, l = 20 \text{ m}, h = 0,7 \text{ m}$) кога е тој поставен во тло со разни вредности на специфичната отпорност во интервалот $50 \Omega\text{m} \leq$

$\rho \leq 500 \Omega\text{m}$. Пресметките да се направат за три вредности на времето на чело: а) $T_c = 1, 2 \mu\text{s}$, б) $T_c = 2, 5 \mu\text{s}$ и в) $T_c = 5 \mu\text{s}$ а резултатите да се прикажат табеларно и графички.

Решение

а) Пресметка на конвенционалната отпорност на заземјувачот

Со постапка идентична на онаа од примерот 5.3 се врши пресметување на бараните величини R_Z , R_i и α на заземјувачот за секој од наведените случаи. Резултатите од пресметките се смесени во табелите П.5.4.1–П.5.4.3 и на сликата П.5.4.1.

Табела П.5.4.1. Импулсни карактеристики на заземјувач во форма на трикрака ѕвезда за $T_c = 1,2 \mu\text{s}$

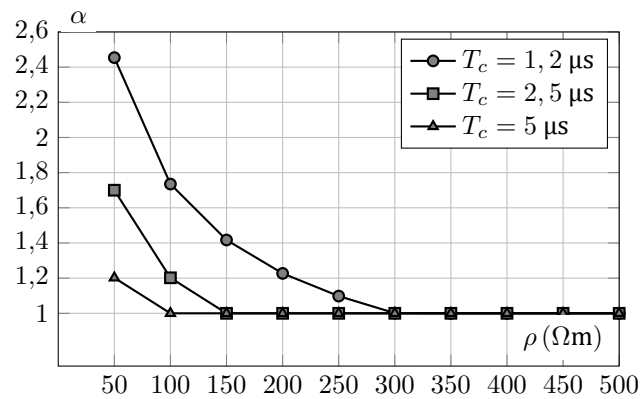
$\rho (\Omega\text{m})$	$l_a (\text{m})$	$R_Z (\Omega)$	$R_i (\Omega)$	α
50	8,0	1,757	4,313	2,454
100	10,7	3,514	6,099	1,735
150	13,9	5,271	7,470	1,417
200	16,1	7,028	8,625	1,227
250	18,0	8,786	9,643	1,098
300	19,7	10,54	10,56	1,001
350	21,3	12,30	12,30	1,000
400	22,7	14,06	14,06	1,000
450	24,1	15,81	15,81	1,000
500	25,4	17,57	17,57	1,000

Табела П.5.4.2. Импулсни карактеристики на заземјувач во форма на трикрака ѕвезда за $T_c = 2,5 \mu\text{s}$

$\rho (\Omega\text{m})$	$l_a (\text{m})$	$R_Z (\Omega)$	$R_i (\Omega)$	α
50	11,6	1,757	2,988	1,700
100	18,4	3,514	4,225	1,202
150	20,1	5,271	5,271	1,000
200	23,2	7,028	7,028	1,000
250	26,0	8,786	8,786	1,000
300	28,4	10,54	10,54	1,000
350	30,7	12,30	12,30	1,000
400	32,8	14,58	14,58	1,000
450	34,8	15,81	15,81	1,000
500	36,7	17,57	17,57	1,000

Табела П.5.4.3. Импулсни карактеристики на заземјувач во форма на трикрака ѕвезда за $T_c = 5 \mu s$

$\rho (\Omega m)$	$l_a (m)$	$R_Z (\Omega)$	$R_i (\Omega)$	α
50	16,4	1,757	2,113	1,202
100	23,2	3,514	3,514	1,000
150	28,4	5,271	5,271	1,000
200	32,8	7,028	7,028	1,000
250	36,7	8,786	8,786	1,000
300	40,2	10,54	10,54	1,000
350	43,4	12,30	12,30	1,000
400	46,4	14,58	14,58	1,000
450	49,3	15,81	15,81	1,000
500	51,9	17,57	17,57	1,000



Слика П.5.4.1. Зависност на импулсниот коефициент $\alpha(\rho)$

□ □ □

5.6.2 Јонизација и електрични празнења во тлото

Од претходниот пример се гледа дека ударните ефекти на стујата на громот што се должат на индуктивноста на заземјувачите се изразени кај стрмните импулси, со мали времиња на челото, и во почви со релативно ниска специфична отпорност ρ . Во земјиштата со висока специфична отпорност овие ефекти практично сосема изостануваат и индуктивноста на заземјувачот скоро и да не доаѓа до израз. Но тогаш се јавуваат други ефекти кои по своето влијание имаат обратно дејство врз големината на ударната отпорност, т.е. доведуваат до нејзино намалување.

Струјата на громот што се одведува од заземјувачот во земјата е голема, од редот на големина на неколку десетици kA, па дури до стотина kA. Толкави големи струи во земјата создаваат силно електрично поле кое може да предизвика електрично искрење и празнење во земјата. Кога се работи за мали струи на одведување од заземјувачот (мали јачини на електричното поле E во земјата) влијанието на јонизацијата и електричното празнење во тлото, кои доведуваат до намалување на отпорноста на заземјувачот, не се изразени. Обратно, кај големите струи на одведување и големите специфични отпорности на тлото, во него се воспоставуваат јаки електрични полиња кои доведуваат до негова јонизација па дури и празнење преку електричен лак. До јонизација доаѓа при јачини на полето од редот на 2–4 kV/cm додека празнењето преку лак се случува при поголеми јачини на полето, од редот на големина 6–10 kV/cm. Обете споменати појави ја намалуваат импулсната отпорност на заземјувачот така што во тие случаи неговиот импулсен коефициент $\alpha < 1$.

Празнењето на громот во надземниот вод предизвикува инјектирање на струјни импулси во заземјувачите од столбовите и иницира сложен електромагнетен преоден процес којшто има бранов карактер и чијашто анализа е прилично сложена. Многу трудови се бавеле со пресметката на овие процеси, но повеќето од нив базирале на примената на упростени модели кои не ги уважувале јонизационите процеси на тлото. Процесите на празнење во тлото во околината на заземјувачките електроди започнуваат да се опфаќаат во анализите дури во последно време.

Може да се каже дека тие сè уште не се доволно проучени така што единствена употреблива опција, барем засега, претставуваат експерименталните истражувања на реалните заземјувачи и симулациите, т.е. експериментите на модели. Првите се можни кога се работи за заземјувачи со мали димензии (т.н. концентрирани заземјувачи). Кога станува збор за пространите заземјувачи со значителни димензии, какви што можат да бидат и зракастите заземјувачи на столбовите од надземните водови, истражувањето на нивните импулсни карактеристики, заради просторните проблеми, најчесто се врши на нивни модели.

5.6.3 Импулсни коефициенти на типските заземјувачи на НВ

И покрај тоа што во стручната литература се среќаваат мноштво емпириски формули, дијаграми и табели, за пресметување на импулсните коефициенти кои се погодни за брзи и практични

пресметки (т.е. проценки) на импулсната отпорност на разните видови заземјувачи овде ќе бидат презентирани емпириски формули за пресметка на импулсниот коефициент α , добиени на база на регресиона анализа на резултатите од експерименталните истражувања на импулсните карактеристики на поголем број типски конфигурации заземјувачи на столбовите од НВ, (табела 5.12) добиени со мерења на модели во размер, вршени во Н.Р. Кина [16]. Експериментите за кои што станува збор се вршени во Лабораторијата за заземјувачки технологии при Универзитетот во Чонгкинг.

Со примена на регресиона анализа на така добиените експериментални резултати се добиени емпириски изрази за пресметка на импулсните коефициенти на разните класи типски заземјувачи. Вака добиените резултати се споредувани со резултатите од мерењата на импулсните карактеристики на реални заземјувачи (full-scale experiments) и на тој начин е верифицирана нивната употребна вредност. Потврдени како успешни, тие денес се вградени во кинеските национални стандарди за проектирање на заземјувачи ([16]).

За разните типови заземјувачи, означени во табелата 5.12 со буквите a, b, c, d, e и f , изведени се емпириски изрази за пресметка на импулсните коефициенти α за разни вредности на специфичната отпорност на тлото ρ (Ωm), параметарот l (m), кој претставува должина на секоја од лентите и темената вредност на импулсната струја на громот I_M (kA). Ти го имаат следниот општиот облик

$$\alpha = a \cdot \rho^{-p} \cdot (b + \sqrt{l}) \cdot (c - e^{-d \cdot I_M^{-q}}), \quad (5.8)$$

и се дадени со следните изрази

$$\alpha = 0,74 \cdot \rho^{-0,4} \cdot (7,0 + \sqrt{l}) \cdot (1,56 - e^{-3,0 \cdot I_M^{-0,4}}) \quad \text{за типот } a, \quad (5.9)$$

$$\alpha = 2,94 \cdot \rho^{-0,5} \cdot (6,0 + \sqrt{l}) \cdot (1,23 - e^{-2,0 \cdot I_M^{-0,3}}) \quad \text{за типот } b, \quad (5.10)$$

$$\alpha = 1,36 \cdot \rho^{-0,4} \cdot (1,3 + \sqrt{l}) \cdot (1,55 - e^{-4,0 \cdot I_M^{-0,4}}) \quad \text{за типот } c, \quad (5.11)$$

$$\alpha = 1,62 \cdot \rho^{-0,4} \cdot (5,0 + \sqrt{l}) \cdot (0,79 - e^{-2,3 \cdot I_M^{-0,2}}) \quad \text{за типот } d, \quad (5.12)$$

$$\alpha = 1,16 \cdot \rho^{-0,4} \cdot (7,1 + \sqrt{l}) \cdot (0,78 - e^{-2,3 \cdot I_M^{-0,2}}) \quad \text{за типот } e, \quad (5.13)$$

$$\alpha = 2,75 \cdot \rho^{-0,4} \cdot (1,8 + \sqrt{l}) \cdot (0,75 - e^{-1,5 \cdot I_M^{-0,2}}) \quad \text{за типот } f. \quad (5.14)$$

Табела 5.12. Анализирани конфигурации заземјувачи при експерименталните истражувања во [16]

Тип	Скица на заземјувачот	Опис на заземјувачот
a		Заземјувач за челично-решеткасти столбови, наменет за терени со ниска ($l = 0$) и висока ($l > 0$) спец. отпорност ρ . ($S = 8 \div 10$ m, $l = 0 \div 50$ m)
b		Заземјувач за портални столбови, наменет за терени со ниска специфична отпорност ρ . ($S = 0 \div 15$ m)
c		Заземјувач за портални столбови, наменет за терени со висока специфична отпорност ρ . ($d = 10$ m; $l = 5 \div 53$ m)
d		Заземјувач за обични, едностоечки бетонски и челично-решеткасти столбови. ($l = 5 \div 100$ m)
e		Заземјувач за обични, едностоечки бетонски и челично-решеткасти столбови.
f		Вертикален заземјувач за обични, едностоечки бетонски и челично-решеткасти столбови. ($l = 5 \div 60$ m)

Со така пресметаните импулсни коефициенти α може да се пресмета и вредноста на импулсната отпорност на заземјувачот за произволни

вредности на било кој од параметрите ρ , l и I_M , со помош на релацијата (5.3)

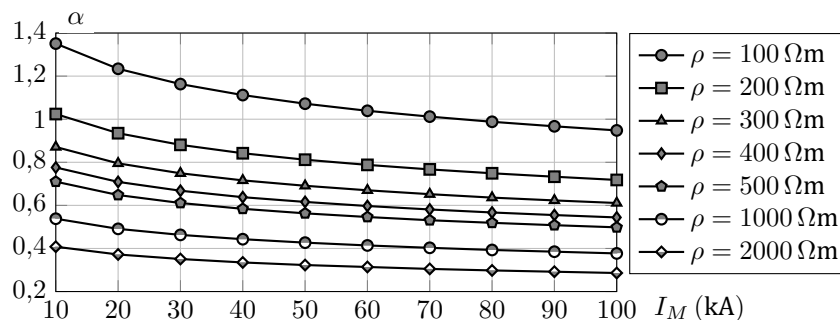
$$R_i = \alpha \cdot R_Z.$$

Отпорноста на распростирање на заземјувачот за наизменична струја R_Z се добива со мерење или пак се пресметува. За типските заземјувачи што се овде обработувани, тој е веќе пресметан и приложен во претходно прикажаните табели.

Доколку се работи за заземјувач на столб со поинаква геометрија од онаа опфатена со табелата 5.12, тогаш секогаш ќе постои можност тој со својот облик да се прилагоди кон некој од типовите означени со $a \dots f$, со цел добиените резултати за пресметка на импулсните коефициенти, дадени со изразите (5.13) – (5.18), да можат да се применат и во тој случај.

Така, на пример, преку споредба на конфигурациите на типските заземјувачи од сликите 5.2 – 5.17 со оние од табелата 5.12 се заклучува дека на заземјувачите од типот A2L и A4L најблиски по конфигурација се заземјувачите од типот e и c од табелата 5.12 – респективно. Со слично размислување се заклучува дека на заземјувачите тип B, B2L и B4L одговараат конфигурациите b , e и a .

За илустрација, во табелата 5.13 и на сликата 5.28 се прикажани некои вредности на импулсниот коефициент на заземјувач во форма на лента (тип d) со должина $l = 20$ m, пресметани според релацијата (5.16). Слично, во табелата 5.14 се прикажани некои вредности на импулсните коефициенти на заземјувачите тип A2L и B2L за должина на краците $l = 10$ m.



Слика 5.28. Импулсни коефициенти за хоризонтален заземјувач со должина 20 m

Пример 5.5. Се посматра 10 kV надземен вод со бетонски столбови и со потпорни изолатори тип PS 12 ($U_{\text{подн}} = 75$ kV). Колкава ќе биде

Табела 5.13. Импулсни коефициенти за хоризонтален заземјувач со должина 20 m

ρ (Ωm)	I_M (kA)									
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
100	1,351	1,234	1,163	1,112	1,072	1,039	1,012	0,988	0,967	0,948
200	1,024	0,935	0,881	0,842	0,812	0,788	0,767	0,749	0,733	0,718
300	0,871	0,795	0,749	0,716	0,691	0,670	0,652	0,636	0,623	0,611
400	0,776	0,709	0,668	0,638	0,616	0,597	0,581	0,567	0,555	0,544
500	0,710	0,648	0,611	0,584	0,563	0,546	0,531	0,519	0,508	0,498
1000	0,538	0,491	0,463	0,443	0,427	0,414	0,403	0,393	0,385	0,377
2000	0,408	0,372	0,351	0,335	0,323	0,314	0,305	0,298	0,292	0,286

Табела 5.14. Импулсни коефициенти на заземјувачите од типот A2 \times 10 и B2 \times 10

ρ (Ωm)	I_M (kA)									
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
100	1,060	0,966	0,909	0,868	0,836	0,810	0,788	0,769	0,753	0,738
500	0,557	0,507	0,478	0,456	0,439	0,426	0,414	0,404	0,395	0,387
1000	0,422	0,385	0,362	0,346	0,333	0,323	0,314	0,306	0,300	0,294
5000	0,222	0,202	0,190	0,182	0,175	0,169	0,165	0,161	0,157	0,154

веројатноста за повратен прескок P_0 при удар на гром во столбот за случајот кога столбовите се заземјени со заземјувачи од типот L2 \times 10 (два крака од по 10 m), закопан во хомогено тло со специфична отпорност $\rho = 100 \Omega\text{m}$. Дали се во тој случај задоволени одредбите од „Правилникот за градба на надземни електроенергетски водови со напон од 1 до 400 kV“, во поглед на потенцијалот на столбот при траен земјоспој, дефинирани со релацијата (5.1) ако капацитивната струја на земјоспој изнесува $I_Z = 20 \text{ A}$.

Решение

Од дијаграмите на сликите 5.20а и 5.20б отчитуваме дека за должина на краците $l = 10 \text{ m}$, заземјувачот од типот L2 \times 10 ги има следните карактеристики

- Отпорност на распространување $R_Z = 8,043 \Omega \approx 8 \Omega$;
- Максимална потенцијална разлика на допир $E_{d.\text{max}} = 37\%$.

Ако претпоставиме дека импулсниот коефициент на овој заземјувач е еднаков на еден ($\alpha = 1$) тогаш ќе имаме

$$\begin{aligned}R_i &= \alpha \cdot R_Z \approx 8 \Omega, \\U_{\text{подн}} &= 75 \text{ kV}, \\I_M &= \frac{U_{\text{подн}}}{R_i} = \frac{75}{8} = 9,375 \text{ kA}.\end{aligned}$$

Притоа со I_M е означена најголемата амплитуда на струјата на громот за која директниот удар во столбот се уште нема да предизвика повратен прескок.

Сега е потребно да утврдиме колкава е веројатноста P_0 амплитудата на струјата на громот да ја надмине вредноста I_M . Неа ќе ја добиеме со помош на табелата 5.1 од која можеме да ја процениме веројатноста $P = P(I \leq I_M)$

$$P_0 = 1 - P = 1 - P(I \leq I_M).$$

Од табелата 5.1, со примена на постапката на линеарна интерполација, добиваме

за $I_M = 5 \text{ kA}$, $P(I \leq I_M) = 0,14$ (14%);

за $I_M = 10 \text{ kA}$, $P(I \leq I_M) = 0,4$ (40%);

за $I_M = 9,375 \text{ kA}$, $P(I \leq I_M) = 0,36754$ (36,75%).

Според тоа веројатноста за повратен прескок P_0 при удар на громот во столб ќе биде

$$P_0 = P(I > I_M) = 1 - 0,3675 = 0,6325 \text{ (63,25\%)}.$$

Значи практично 2/3 од ударите во столбовите од овој далекувод ќе предизвикуваат повратен пресекок, а само 1/3 од нив нема да предизвикаат повратен прескок.

Условот (5.1) за најголемиот дозволен напон на столбот, според членот 80 од Правилникот, нема да биде задоволен бидејќи е

$$U_Z = R_Z \cdot I_Z = 8 \cdot 20 = 160 \text{ V} > 125 \text{ V}.$$

Но сепак треба да се нагласи дека иако оваа одредба од Правилникот не е задоволена, сепак реална опасност од појава на превисок напон на допир не постои бидејќи е

$$E_{\text{d,max}} = \frac{37}{100} \cdot U_Z = \frac{37}{100} \cdot 160 = 59 \text{ V} < 65 \text{ V}.$$

□ □ □

Пример 5.6. Да се пресмета колкава треба да биде должината на краците на заземјувачот тип $L2 \times l$ од претходниот пример ако сакаме далекуводот да биде „отпорен“ на громови со амплитуда на струјата до 15 kA, или, како што се вели, „заштитното ниво“ на водот да биде $I_0 = 15$ kA.

Решение

За да се постигне заштитно ниво на водот $I_0 = 15$ kA, ќе биде потребно отпорноста на распростирање на заземјувачите да биде

$$R_Z = \frac{U_{\text{подн}}}{I_0} = \frac{75}{15} = 5 \Omega.$$

Од табелата 4.3 ја отчитуваме бараната вредност на должината l на краците $l \approx 18$ m („точната“ вредност, добиена со линеарна интерполација, е $l = 18,5$ m).

Значи, ако заземјувачите на столбовите од далекуводот ги изведеме со должина на краците од по 18,5 m, тогаш далекуводот ќе биде отпорен на сите удари на громот со амплитуда до 15 kA. Во тој случај, како што се гледа од табелата 5.1, 62% од ударите нема да предизвикаат повратен прескок, а само 38% од нив ќе бидат опасни за далекуводот.



Пример 5.7. Да се реши случајот разгледуван во примерот 5.6 ако надземниот вод се изведе со потпорни изолатори од типот PS 24, наменети за 20 kV водови, чиј поднослив импулсен напон изнесува $U_{\text{подн}} = 125$ kV.

Решение

Во овој случај ќе имаме

$$I_0 = \frac{U}{R_Z} = \frac{125}{8} = 15,63 \text{ kA}.$$

Значи заштитното ниво на водот изнесува $I_0 = 15,63$ kA, бидејќи секое директно празнење во столбовите со амплитуда на струјата под оваа вредност нема да предизвика повратен прескок.

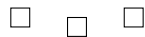
Веројатноста за повратен прескок P_0 ќе се добие на следниот начин

$$P(I < I_0) = P(I < 15,63) = 0,64 (64\%),$$
$$P_0 = P(I \geq I_0) = 1 - P(I < I_0) = 0,36 (36\%).$$

Во овој случај, значи, ќе имаме обратна ситуација: само 1/3 од ударите на громот во столбовите ќе предизвикаат повратен прескок.

Очигледно е дека оваа мерка за зголемување на доверливоста на работењето на надземниот вод е подеднакво ефикасна како мерката анализирана во претходниот пример. Разликата е во тоа што за зголемување на должината на краците (како во примерот 5.6) се потребни дополнителни градежни зафати (кои на веќе изведен далекувод понекогаш не се можни, особено кога станува збор за далекувод што минува низ населено место) и дополнителни инвестиции. Во случајов (со цена на заземјувањето од 10 €/m) тие дополнителни инвестиции се проценуваат некаде на 170 €/столб или околу 1700 €/km.

За разлика од зафатот во заземјувањето, промената на изолацијата е многу поедноставен и поефтин зафат, особено ако примената на 20 kV изолатори е предвидена уште при самата изведба на водот. Разликата во цена помеѓу потпорните изолатори за 10 и 20 kV напон е мала и изнесува 4 – 5 €/изолатор, така што просечната цена на целиот зафат во овој случај би изнесувал не повеќе од $3 \times 5 = 15$ €/столб или приближно 150 €/km.



Пример 5.8. Столбовите од еден 20 kV надземен вод е предвидено да се заземјуваат со прстенести заземјувачи во форма на круг, изведени од цинкувана челична лента FeZn 30×4 ($d = 22$ mm), закопана на длабочина $h = 0,7$ m. Столбовите минуваат низ терени со различни специфични отпорности на тлото $\rho \in \{50, 100, 150, 200, 300\} \Omega\text{m}$. За секој од нив да се пресмета потребниот пречник на кругот D така што отпорноста на распростирање на заземјувачот, во согласност со Препораката ТП 7, да изнесува $R_Z = 15 \Omega$.

Решение

Како што е познато, за пресметување на отпорноста R_Z на предвидениот заземјувач постои следната емпириска формула

$$R_Z = \frac{\rho}{\pi^2 \cdot D} \cdot \ln \frac{4 \cdot D}{\sqrt{h \cdot d}}.$$

Да го пресметаме најнапред потребниот пречник на кругот D за случајот кога е $\rho = 100 \Omega\text{m}$, а потоа истата постапка ќе ја повториме и за останатите случаи на специфичната отпорност на тлото ρ .

Како што може да се види од обликот на формулата пресметувањето на потребниот пречник D со помош на оваа формула води кон решавање на една трансцедентна равенка која не го дава директно бараното

решение. Затоа проблемот ќе го решиме итеративно, со помош на следната рекурентна формула

$$D_k = \frac{\rho}{\pi^2 \cdot R_Z} \cdot \ln \frac{4 \cdot D_{k-1}}{\sqrt{h \cdot d}}; \quad k = 1, 2, \dots \quad (\text{П.5.8.1})$$

во која со D_k е означена вредноста на бараната променлива во k -тата итерација.

Секоја итеративна постапка бара добро почетно решение кое треба да биде доволно блиску до вистинското за да може итеративниот процес брзо и сигурно да заврши. Нека претпоставиме дека тоа почетно решение изнесува $D_0 = 1$ m.

Во случајот кога е $\rho = 100 \Omega\text{m}$, итеративниот процес на решавање би изгледал вака

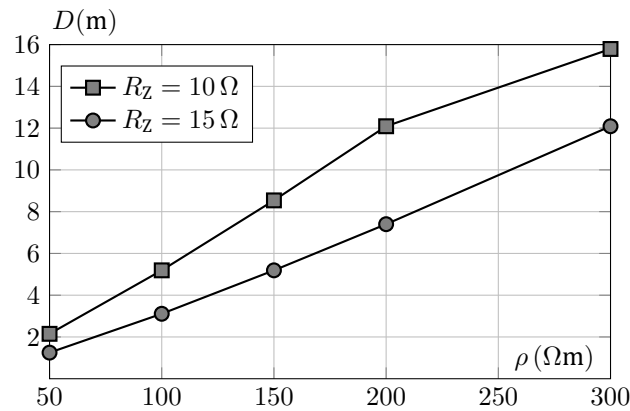
$$\begin{aligned} D_1 &= \frac{\rho}{\pi^2 \cdot R_Z} \cdot \ln \frac{4 \cdot D_0}{\sqrt{h \cdot d}} = \frac{100}{\pi^2 \cdot 15} \cdot \ln \frac{4 \cdot 1}{\sqrt{0,7 \cdot 0,022}} = 2,35 \text{ m}; \\ D_2 &= \frac{\rho}{\pi^2 \cdot R_Z} \cdot \ln \frac{4 \cdot D_1}{\sqrt{h \cdot d}} = \frac{100}{\pi^2 \cdot 15} \cdot \ln \frac{4 \cdot 2,35}{\sqrt{0,7 \cdot 0,022}} = 2,92 \text{ m}; \\ &\vdots \end{aligned}$$

По само неколку итерации се добива бараното решение (заокружено на втора децимала): $D = 3,11$ m.

На сличен начин се добиваат потребните димензии на пречникот D на заземјувачот и за останатите вредности на специфичната отпорност на тлото. Тие се прикажани во табелата П.5.8.1 и на дијаграмот од сликата П.5.8.1. На истата табела и слика е прикажан и случајот кога се бара да биде $R_Z = 10 \Omega$.

Табела П.5.8.1. Зависност $D(\rho)$ кај хоризонтален заземјувач во форма на круг со пречник D

ρ (Ωm)	50	100	150	200	300
D (m) за $R_Z = 15 \Omega$	1,25	3,11	5,19	7,40	12,09
D (m) за $R_Z = 10 \Omega$	2,15	5,19	8,54	12,09	15,79



Слика П.5.8.1. Зависност $D(\rho)$ кај хоризонтален заземјувач во форма на круг со пречник D



Пример 5.9. Заземјувачите од првите 10 столбови на еден 35 kV далекувод, коишто му припаѓаат на штитениот приод од една трафостаница 110/35/10 kV/kV/kV треба да се заземјат со зракасти заземјувачи со мала импулсна отпорност. За секој од заземјувачите на столбовите е предвидено да се употреби поцинкувана челична лента FeZn 30×4 со вкупна должина $L_{\Sigma} = 60$ m. Специфичната отпорност на тлото изнесува $\rho = 100 \Omega\text{m}$. Струјниот импулс на громот има облик 1,2/50 μs ($T_c = 1, 2 \mu\text{s}$). Притоа е можно да се усвои една од следните 4 конфигурации на симетрични зракасти заземјувачи (видете ја задачата 5.1):

- 1) 2L, 2) 3L, 3) 4L, 4) 6L.

- а) да се утврди која од споменатите 4 конфигурации ќе има најмала импулсна отпорност.
 б) задачата да се повтори и за случајот кога челото на струјниот имулс има должина $T_c = 2, 5 \mu\text{s}$ и $T_c = 5 \mu\text{s}$.

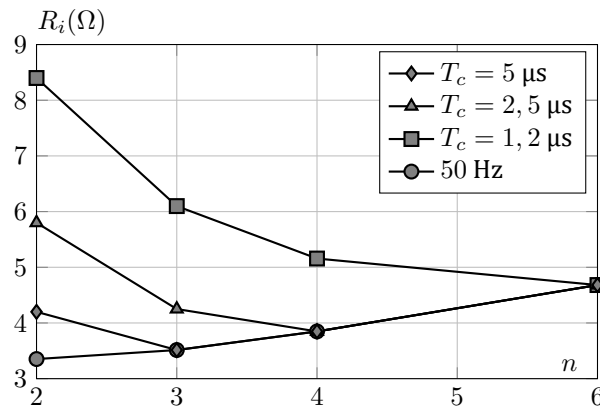
Решение

На начин подобен на оној применет во примерот 5.2, со помош на првата релација и табела, изложени во примерот 5.1, се вршат пресметки на конвенционалната отпорност R_Z , импулсната отпорност R_i и ударниот коефициент α . На тој начин се добиваат бараните резултати за случајот под а), кога специфичната отпорност на тлото изнесува $\rho = 100 \Omega\text{m}$ и $T_c = 1, 2 \mu\text{s}$. Резултатите се прикажани

во табелата П.5.9.1. Истите резултати се графички прикажани и на дијаграмот од сликата П.5.9.1.

Табела П.5.9.1. Зависност $R_Z(n)$ и $R_i(n)$ на зракаст хоризонтален заземјувач со сумарна должина $L_\Sigma = 60$ m и со различен број на краците n при $T_c = 1, 2 \mu\text{s}$

n	2	3	4	6
L_Σ (m)	2×30	3×20	4×15	6×10
η	0,870	0,768	0,662	0,498
R_Z (Ω)	3,352	3,514	3,848	4,681
R_i (Ω)	8,399	6,099	5,157	4,681
l_a (m)	11,5	11,4	11,3	11,1



Слика П.5.9.1. Графички приказ на зависноста $R_i(n)$ кај зракастите заземјувачи

Од резултатите прикажани во табелата П.5.9.1 и сликата П.5.9.1 се гледа дека ударниот ефект што се должи на присуството на индуктивноста на краците од заземјувачот, за стрмните импулси со време на челото $T_c = 1, 2 \mu\text{s}$, се силно изразени. Во таквите случаи најповолна варијанта е ѕвездата со $n = 6$ краци ($R_i = 4, 681 \Omega$) бидејќи таа има најмала ударна отпорност. Тоа се должи на фактот што за ваквите струјни импулси активната должина на краците изнесува околу 11,3 m додека должината на краците кај шестокраката ѕвезда е 10 m.

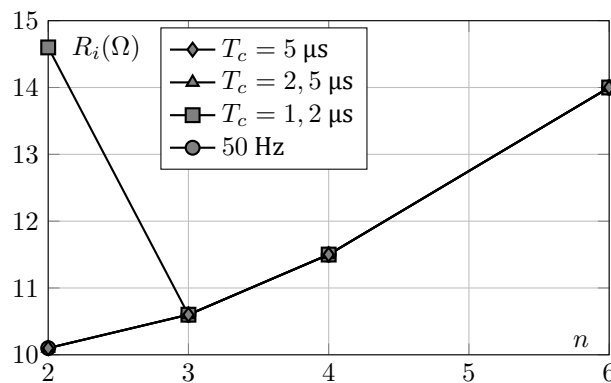
На сликата П.5.9.1, покрај случајот кога е $T_c = 1, 2 \mu\text{s}$, се прикажани и резултатите за зависноста $R_i(n)$ за струјни импулси со поголеми времиња на челото и тоа за 2,5 и за 5 μs . Од оваа слика гледаме дека

ударните ефекти на простирање кај краците се сега, заради помалата стрмнина на струјата, помали, така што оптималното решение се добива за $n = 4$, кога се работи за чело $T_c = 2,5 \mu\text{s}$ ($R_i = 3,848 \Omega$) односно $n = 3$, за струјните импулси со време на челото $T_c = 5 \mu\text{s}$ ($R_i = 3,514 \Omega$).

Од овој пример може да се заклучи дека кога се работи за импулсни отпорности на распростирање на заземјувачите, не постои еднозначно оптимално решение. За пострмните импулси подобри се решенијата со помали должини на краците и со поголем број краци. Обратно, за поблагите импулси подобри се решенијата со помал број краци бидејќи кај нив импулсната отпорност се доближува со својата големина до конвенционалната отпорност на распростирање R_Z а во исто време тие имаат повисок коефициент на полезно дејство η .

На крајот да кажеме уште неколку збора за влијанието на големината на специфичната отпорност на тлото врз ударните ефекти кај заземјувачите.

Како што веќе беше покажано во примерот 5.3, индуктивноста на заземјувачите доаѓа до израз кај стрмните импулси и кај почвите со ниска специфична отпорност. Колку отпорноста ρ на почвата е поголема, толку ударните ефекти кај заземјувачот се намалуваат и стануваат помалку влијателни. Така, на пример, ако претходните анализи ги спроведеме за случајот кога е $\rho = 300 \Omega\text{m}$, ќе ги добиеме резултатите прикажани на сликата П.5.9.2. За почви со $\rho \geq 500 \Omega\text{m}$ ударните ефекти што се должат на присуството на индуктивноста на заземјувачите скоро целосно изостануваат и можат слободно да се занемарат. Во тие случаи доминантни се обратните ефекти предизвикани од искрењето и електричното празнење во почвата и кои доведуваат до намалување на импулсната отпорност на заземјувачот.



Слика П.5.9.2. Графички приказ на зависноста $R_i(n)$ кај зракастите заземјувачи кога е $\rho = 300 \Omega\text{m}$



Пример 5.10. Со помош на програмата `lenta_impuls` да се изврши пресметка на временскиот тек на напонот на заземјувачот од примерот 5.2 ($\text{FeZn } 30 \times 4$, $l = 20 \text{ m}$, $h = 0,7 \text{ m}$; $\rho = 100 \Omega\text{m}$) за случај кога импулсот на струјата на громот има темена вредност $I_M = 25 \text{ kA}$ а неговиот облик има параметри: а) 1,2/50; б) 2,5/50 и в) 5/50 μs . Колкави се вредностите на импулсниот коефициент α добиен на тој начин?

Решение

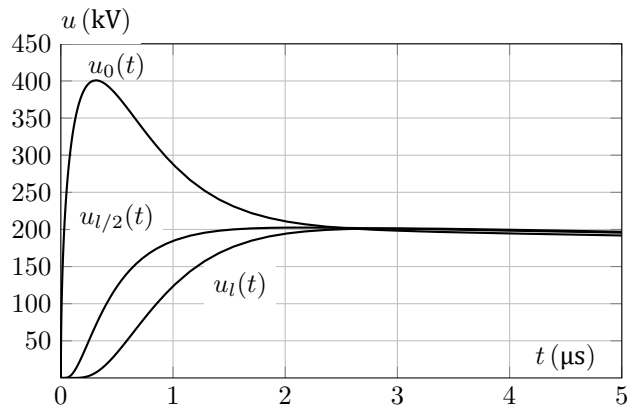
Со помош на програмата, дадена во продолжение, е вршена симулција на преодниот процес што се јавува при простирање на струјниот импулс на громот по должината на долг лентест заземјувач. На тој начин е добиен временскиот тек на напонот $u_0(t)$ на самиот почеток од лентата ($x = 0$) како и напоните $u_{l/2}(t)$ и $u_l(t)$ на нејзината средина ($x = l/2$) и нејзиниот крај ($x = l$). Резултатите од пресметките, за $T_c = 1,2 \mu\text{s}$, се графички прикажани на сликата П.5.10.1.

programi/impuls/lenta_tri_impulsi.m

```

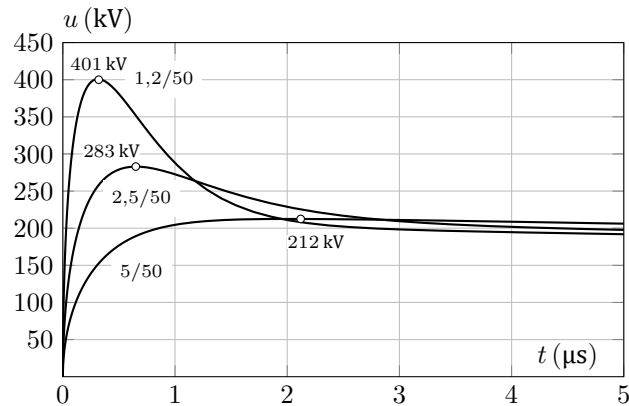
1 % impuls 1.2/50
2 [t1,i1,j1,u1] = lenta_impuls(100,0.7,20,25,1.2e-6,50e-6,5e-6);
3 plot(t1,u1(:,1),[1 21 41])); xlim([0 5e-6]); ylim([0 450])
4 % impuls 2.5/50
5 [t2,i2,j2,u2] = lenta_impuls(100,0.7,20,25,2.5e-6,50e-6,5e-6);
6 % impuls 5/50
7 [t3,i3,j3,u3] = lenta_impuls(100,0.7,20,25,5e-6,50e-6,5e-6);
8 figure; plot(t1,u1(:,1),t2,u2(:,1),t3,u3(:,1)); xlim([0 5e-6]);
   ylim([0 450])

```



Слика П.5.10.1. Зависност на напонот $u(t)$ за заземјувач во форма на лента со должина 20 m во разни точки по неговата должина

Резултатите од симулациите со помош на кои што се пресметани временските текови на напонот на заземјувачот $U_Z(t)$ за сите 3 случаи, наведени под а) б) и в), се прикажани на сликата П.5.10.2.



Слика П.5.10.2. Временски тек на напонот на заземјувачот $u_z(t)$ за лента со должина 20 m за разни облици на струјниот импулс

Импулсната отпорност на заземјувачот R_i се дефинира како однос помеѓу темената вредност на напонот U_M и темената вредност на струјата I_M , т.е $R_i = U_M/I_M$. Импулсниот коефициент α , пак, се дефинира како однос помеѓу импулсната отпорност R_i и конвенционалната отпорност на распростирање на заземјувачот за фреквенција 50 Hz R_Z , која за дадениот заземјувач изнесува $R_Z = 8,1 \Omega$ (видете го примерот 5.2). На тој начин се пресметуваат импулсните отпорности R_i и коефициентите α_i за секој од трите облици на струјниот импулс

а) облик на струјниот импулс 1,2/50 μs

$$R_{i(1,2/50)} = \frac{401}{25} = 16,04 \Omega; \quad \alpha_{1,2/50} = \frac{16,04}{8,1} = 1,98.$$

б) облик на струјниот импулс 2,5/50 μs

$$R_{i(2,5/50)} = \frac{283}{25} = 11,32 \Omega; \quad \alpha_{2,5/50} = \frac{11,32}{8,1} = 1,40.$$

в) облик на струјниот импулс 5/50 μs

$$R_{i(5/50)} = \frac{212}{25} = 8,48 \Omega; \quad \alpha_{5/50} = \frac{8,48}{8,1} = 1,05.$$

□ □ □

Задача 5.1. Столбовите од 20 kV надземен вод, анализиран во примерот 5.6, е предвидено да се заземјуваат со заземјувачи во форма на четирикрака ѕвезда, изведени од поцинкувана челична лента FeZn 30×4

($d = 22 \text{ mm}$), закопана на длабочина $h = 0,7 \text{ m}$. Водот минува низ терени со различни специфични отпорности на тлото $\rho \in \{100, 300, 500\} \Omega\text{m}$.

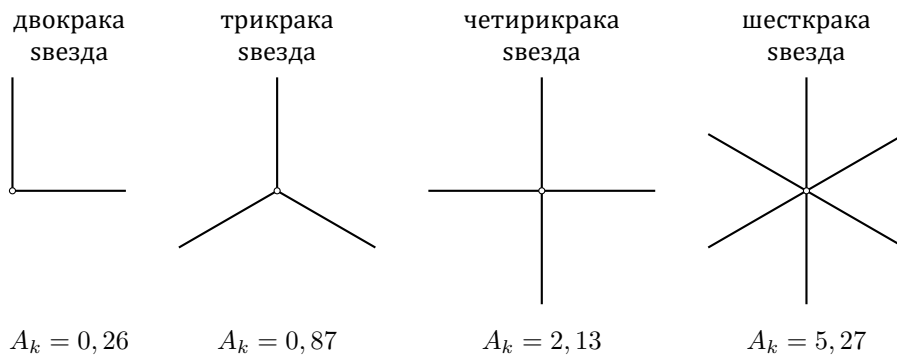
За секој од овие три случаи да се пресмета потребната должина l на краците од ѕвездата така што отпорноста на распростирање на заземјувачот на столбот, во согласност со Препораката ТП 7, да изнесува $R_Z = 15 \Omega$.

Задачата да се реши на два начина

- со помош на табелата 5.3, применувајќи ја постапката на линеарна интерполација;
- аналитички, со помош на следната емпириска формула

$$R_Z = \frac{\rho}{2\pi L_\Sigma} \cdot \left(\ln \frac{L_\Sigma^2}{d \cdot h} + A_k \right)$$

Емпирииската формула е општа и важи за зракастите заземјувачи со 2, 3, 4 и 6 краци, во согласност со следната слика. Во неа со A_k е означена емпирииската константа чија вредност зависи од бројот на краците k , додека со L_Σ е означена сумарната должина на краците од ѕвездата, т.е. $L_\Sigma = k \cdot l$. Во случајот на четирикрака ѕвезда се добива $L_\Sigma = 4 \cdot l$.



Слика 3.5.1.1. Зависност на коефициентот A_k од обликот на зракастиот заземјувач

Напомена: Резултатите од табелата 5.3 се однесуваат на случајот кога во пресметките е земено предвид и присуството на темелот на столбот, поради што не треба да се очекува целосно совпаѓање на резултатите добиени на двата различни начина.

□ □ □

6

ЗАЗЕМЈУВАЧИ НА ТС СН/НН И ВН/СН

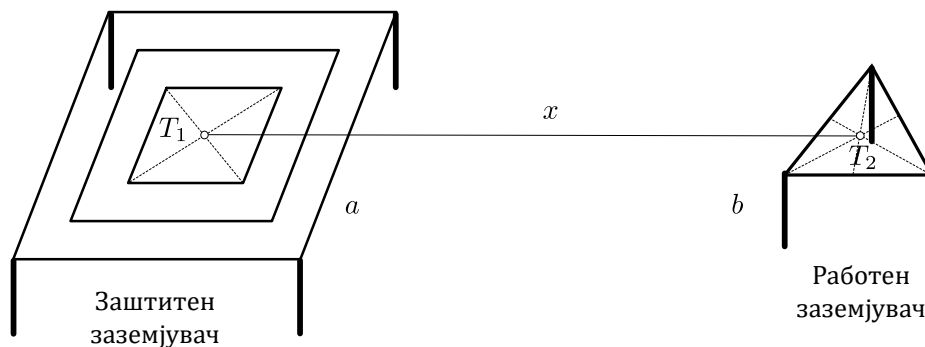
Разводните постројки и трансформаторските станици имаат сопствени заземјувачи, неопходни за правилното функционирање на уредите во нив и на заштитата од грешки. Проблемите сврзани со заземјувањето во една постројка зависат во голема мера од третманот на неутралната точка на мрежата во која што е таа приклучена. Во високонапонските мрежи со номинален напон 110, 220 и 400 kV, вообичаено е да се применува директно заземјување на неутралната точка додека кај пониските напони неутралната точка на мрежата е изолирана, заземјена преку индуктивитет наречен Петерсенов калем (компензирана мрежа) или пак заземјена преку мала импеданција. Затоа и струите на еднофазна куса врска/доземен спој се кај различните мрежи различни, а поради тоа и обликот, димензиите и дизајнот на заземјувачите во нив ќе бидат различни. Најмали проблеми со заземјувањето се во СН дистрибутивни мрежи па затоа и заземјувачите на трансформаторските станици ТС СН/СН и ТС СН/НН се наједноставни. Затоа со анализите ќе започнеме од нив.

6.1 Заштитни заземјувачи на ТС СН/НН

Кај трансформаторските станици ТС СН/НН се среќаваме со два вида заземјувачи: *заштитни* и *работни* (слика 6.1). Секој од споменатите заземјувачи си има своја улога.

Заштитните заземјувачи на ТС СН/НН имаат две задачи: 1) да ја одведат струјата на доземен спој во земјата и 2) да извршат поволно обликување на потенцијалите во околината на самата ТС. Обете улоги се подеднакво важни за правилната заштита на ТС и на луѓето кои доаѓаат во контакт со нив.

Заштитните заземјувачи на ТС СН/НН се изведуваат најчесто со помош на две или три правоаголни контури чиешто димензии зависат од габаритот на градежниот објект во којшто е сместена самата ТС.



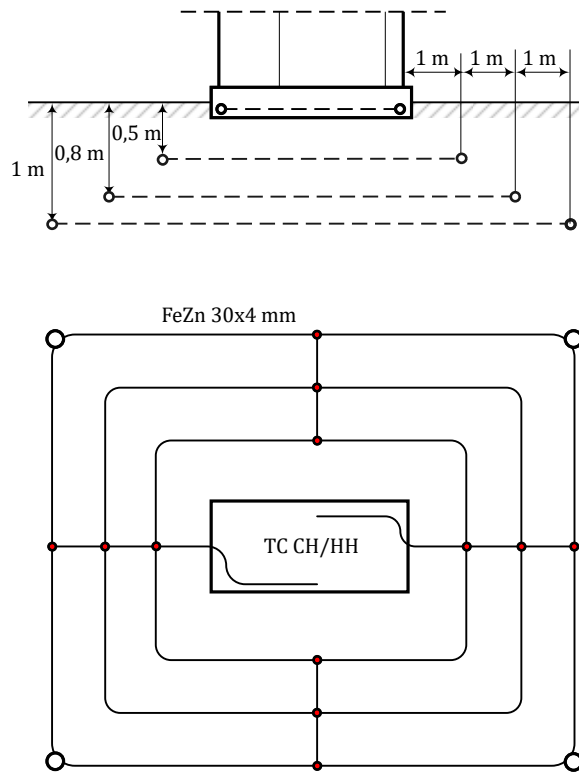
Слика 6.1. Заштитен и работен заземјувач – галвански одвоени

Обично за нивната изведба се користат типски решенија. Едно такво типско решение кое што доста често се применувало во Република Македонија е предвидено со Техничката препорака ТП 7 [11], широко користена на овие простори во изминатите триесетина години. Некои електродистрибутивни организации кај нас применуваат сопствени типски решенија, слични на оние предвидени со Препораката [11].

6.1.1 Типски заштитни заземјувачи на ТС СН/НН според Препораката ТП 7 [11]

Техничката препорака ТП 7 [11] се однесува на заземјувањето во СН дистрибутивни мрежи. Таа долго време се применувала во бившата СФРЈ, а и денес се применува во сите нејзини делови па и кај нас. Според оваа препорака, покрај вообичаениот темелен заземјувач, којшто го имаат сите заштитни заземјувачи на ТС СН/НН, во мрежите со изолирана неутрална точка тие се изведуваат како двоконтурни, додека во мрежите со заземјена неутрална точка преку мал активен отпор се практикува воведување и на трета контура бидејќи во тој случај струите на доземен спој се значително поголеми па од заземјувачот се бара да има подобри перформанси.

Првата контура од заземјувачот, според ТП 7, се поставува на растојание 1 m од ѕидот на објектот на ТС и на длабочина 0,5 m (слика 6.2). На растојание од 1 m од неа и на длабочина од 0,8 m се поставува втората правоаголна контура. Доколку е предвидено поставување и на трета контура, тогаш таа се поставува повторно на растојание 1 m од втората, средна, контура и на длабочина од околу 1 m. Покрај ова, во темињата на последната, надворешна контура, без оглед дали се работи за заштитен заземјувач со две или три контури, е предвидено поставување на 4 вертикални сонди.



Слика 6.2. Заштитен заземјувач на ТС 10/0,4 според Препорака ТП 7

Сите елементи од заштитниот заземјувач (надворешните контури од заземјувачот, вклучувајќи ја тука и контурата од темелниот заземјувач како и четирите вертикални сонди, се поврзуваат галвански помеѓу себе. Контурите се изведуваат од челични поцинкувани ленти FeZn 30×4 mm×mm, додека вертикалните сонди од челични поцинкувани цевки Φ2" (50,8 mm) со должина $l = 3$ m. Техничката препорака ТП-7, заради поголема трајност на заземјувачот, место FeZn лента препорачува примена на бакарно јаже.

Според Препораката [11], заштитниот заземјувач на ТС СН/НН задоволува, (условите за безбедност се исполнети), ако за отпорноста на заземјувачот важи $R_z \leq 5 \Omega$.

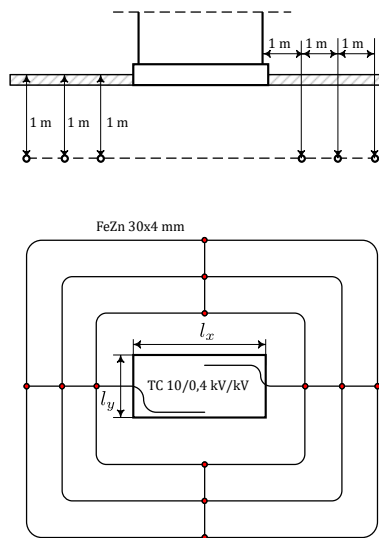
6.1.2 Останати видови типски заштитни заземјувачи на ТС СН/НН

Постојат и други форми заштитни заземјувачи на ТС СН/НН. Во некои македонски електродистрибуции, покрај погоре опишаните, се изведуваат и други видови заштитни заземјувачи, слични на оние

предвидени со Препораката ТП 7, а кои всушност претставуваат нивна модификација. Така, на пример, во СН дистрибутивна мрежа на Охрид се применуваат три основни типски форми заштитни заземјувачи, означени во натамошниот дел од текстот како тип 1, 2 и 3, и нивните карактеристики ќе бидат подетално проучени во наредниот дел.

На сликата 6.3 е прикажана скицата на заштитниот заземјувач тип 1. Тој е составен од три правоаголни контури поставени на иста длабочина $h = 1\text{ m}$, без вертикални сонди во темињата на периферната, трета, контура. Овој заземјувач се среќава во 5 изведби / модификации при што разликите помеѓу нив се во димензиите на контурите кои зависат од габаритот на самиот објект т.е. од бројот на трансформатори сместен во објектот на ТС.

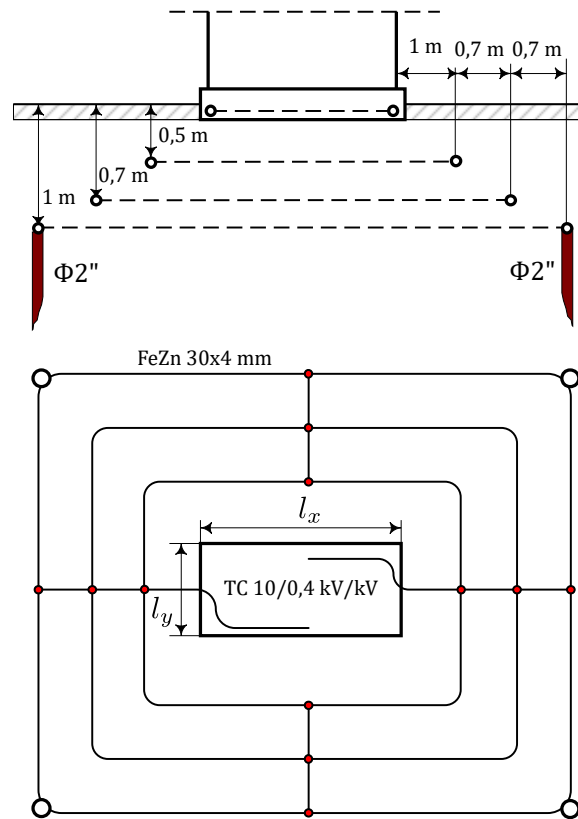
Заземјувачот од типот 2 е исто така троконтурен. Се разликува од типот 1 по тоа што кај него длабочините на закопување на одделните прстени се различни, а покрај тоа, кај него е предвидено поставување на 4 вертикални сонди $\Phi 2''$ од по 3 m во темињата на периферната контура (слика 6.4).



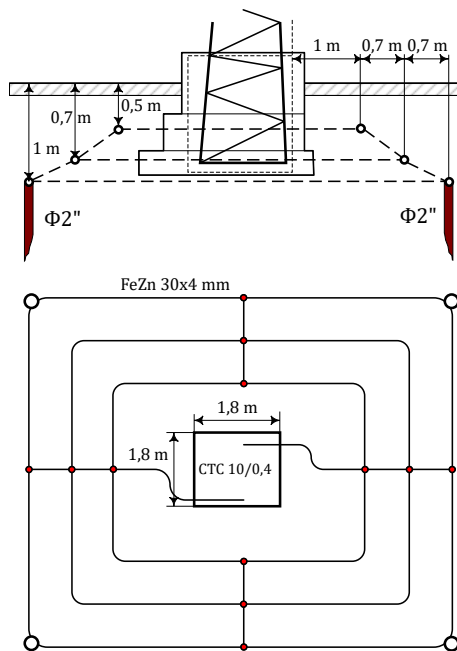
Слика 6.3. Заштитен заземјувач на ТС 10/0,4 – тип 1 во зграда или во полиестерска куќичка

Типот 3, (слика 6.5), е триконтурен заштитен заземјувач наменет за заземјување на столбна трансформаторска станица (СТС) со само еден трансформатор.

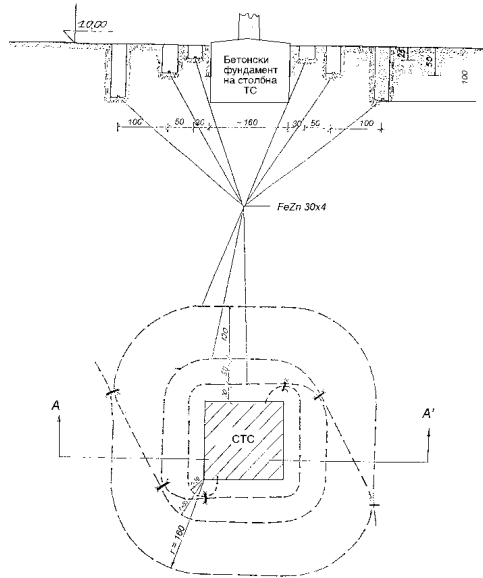
На сликата 6.6 е прикажана скица на еден троконтурен заштитен заземјувач за СТС, изведен во една селска дистрибутивна 10 kV мрежа.



Слика 6.4. Заштитен заземјувач на ТС 10/0,4 – тип 2 со различни длабочини на закопување



Слика 6.5. Заштитен заземјувач на столбна ТС 10/0,4 – тип 3



Слика 6.6. Скица на еден изведен заштитен заземјувач на столбна ТС 10/0,4 kV/kV

6.1.3 Основни карактеристики на некои од типските заштитните заземјувачи

Карактеристиките на заземјувачите од типот 1, 2 и 3 се анализирани на некои конкретни случаи, изложени во табелата 6.1. При тоа, пресметувани се: специфичната отпорност на распространување \mathfrak{R}_Z во услови кога е $\rho = 100 \Omega\text{m}$ како и максималната (max), средната (med) и минималната (min) вредност на потенцијалните разлики на допир и чекор. Добиените резултати се прикажани во табелите 6.2, и 6.3. Тие се општи бидејќи процентуалните вредности за E_d и E_c не зависат од специфичната отпорност на толо додека отпорноста R_Z на заштитниот заземјувач за други вредности на специфичната отпорност на толо ρ ($\rho \neq 100 \Omega\text{m}$) ќе биде

$$R_Z = \mathfrak{R}_Z \cdot \frac{\rho}{100}.$$

Вредностите $E_{d,max}$, $E_{d,med}$ и $E_{d,min}$ за за потенцијалните разлики на допир како и вредностите $E_{c,max}$, $E_{c,med}$ и $E_{c,min}$ за потенцијалните разлики на чекор се отчитуваат од фреквентните хистограми на заземјувачите коишто се добиваат со помош на симулацијата Монте Карло.

Табела 6.1. Отпорност на распростирање на типските заштитни заземјувачи

Тип	а)	б)	в)	$l_x \times l_y$ (m)	Опис
	$R_Z(\Omega)$	$R_Z(\Omega)$	$R_Z(\Omega)$		
1/1	4,09	4,88	4,64	1,6×3,2	Зграда или полиестерска куќичка
1/2	3,28	3,75	3,57	5,0×5,5	Зграда или полиестерска куќичка
1/3	2,97	3,35	3,20	6,0×7,5	Зграда или полиестерска куќичка
1/4	3,99	4,67	4,43	1,9×3,8	Полиестерска и монтажна
1/5	2,55	2,81	2,69	10,0×10,0	Сидана
2/1	4,65	4,77	5,45	1,8×2,7	Блиндирана
2/2	3,99	4,09	4,50	3,2×4,8	Сидана или бетонска
2/3	3,60	3,70	3,99	4,8×5,8	Сидана или бетонска
3	4,86	4,98	5,77	1,8×1,8	Столбна ТС

Од прикажаните резултати се гледа дека димензионирањето на заштитните заземјувачи треба да се врши во однос на потенцијалната разлика на чекор $E_{c,max}$ бидејќи, во принцип, важи $E_{c,max} > E_{d,max}$, иако за просечните вредности на овие потенцијални разлики важи обратното, т.е. $E_{d,med} > E_{c,med}$.

Табела 6.2. Потенцијални разлики на допир (максимална, просечна и минимална вредност)

Тип	а) $E_d(\%)$			б) $E_d(\%)$			в) $E_d(\%)$		
	max	med	min	max	med	min	max	med	min
1/1	8	7,3	7	15	12,8	11	10	8,4	8
1/2	9	7,8	7	16	12,9	10	10	8,4	7
1/3	10	7,8	7	16	12,7	10	10	8,4	7
1/4	8	7,3	7	15	12,8	11	10	8,4	7
1/5	10	7,6	7	16	11,8	11	11	7,8	7
2/1	7	5,8	4	10	8,4	6	8	6,6	5
2/2	7	6,1	4	10	8,6	6	8	6,6	5
2/3	8	6,1	5	11	8,9	6	8	6,7	5
3	6	5,6	4	10	8,3	6	8	6,6	5

**Табела 6.3. Потенцијални разлики на чекор
(максимална, просечна и минимална вредност)**

Тип	а) $E_c(\%)$			б) $E_c(\%)$			в) $E_c(\%)$		
	max	med	min	max	med	min	max	med	min
1/1	13	4,7	0	14	5,0	0	14	5,3	0
1/2	10	2,1	0	8	2,6	0	11	2,4	0
1/3	6	1,7	0	6	4,7	0	8	1,8	0
1/4	13	4,7	0	14	4,7	0	14	4,8	0
1/5	6	4,5	0	6	4,7	0	12	4,7	0
2/1	15	6,5	0	13	6,2	0	17	7,5	0
2/2	14	7,1	0	13	5,0	0	16	5,9	0
2/3	14	3,9	0	12	4,0	0	15	4,5	0
3	15	6,7	0	13	6,5	0	17	7,5	0

Напомена: Податоците во табелите 6.1, 6.2 и 6.3 се однесуваат на основните конфигурации заштитни заземјувачи, означени со болдирани бројки, но и на некои нивни модификации. Притоа модификациите се следните

- а) сите типови се со додадени 4 вертикални сонди,
- б) сите типови се без средната контура за обликување на потенцијалот,
- в) сите типови се без вертикалните сонди.

Освен тоа од добиените резултати може да се заклучи следното

Просечните вредности $E_{d.med}$ и $E_{c.med}$ имаат највисоки вредности кај заземјувачите од типот 1 заради лошото обликување на потенцијалот околу ТС како резултат на поставеноста на трите контури на иста длабочина. Поповолно од аспект на обликување на потенцијалите околу ТС е кога заземјувачот се изведе така што надворешната контура да биде поставена на поголема длабочина од внатрешната.

Отпорноста на распростирање на заземјувачот, во основа, зависи од димензиите на надворешната контура. Со зголемувањето на димензиите на надворешната контура се постигнува намалување на отпорноста R_Z и подобро обликување на потенцијалот, (просечните вредности $E_{d.med}$ и $E_{c.med}$ се намалуваат).

Присуството на вертикалните сонди влијае врз намалувањето на отпорноста R_Z на заземјувачот но само за 10 до 18%. Уделот на вертикалните сонди во смалувањето на потенцијалните разлики на допир е помал од 15 %.

Присуството на средната контура во заземјувачот сосема малку влијае врз намалувањето (за помалку од 5%) на вредноста на отпорноста

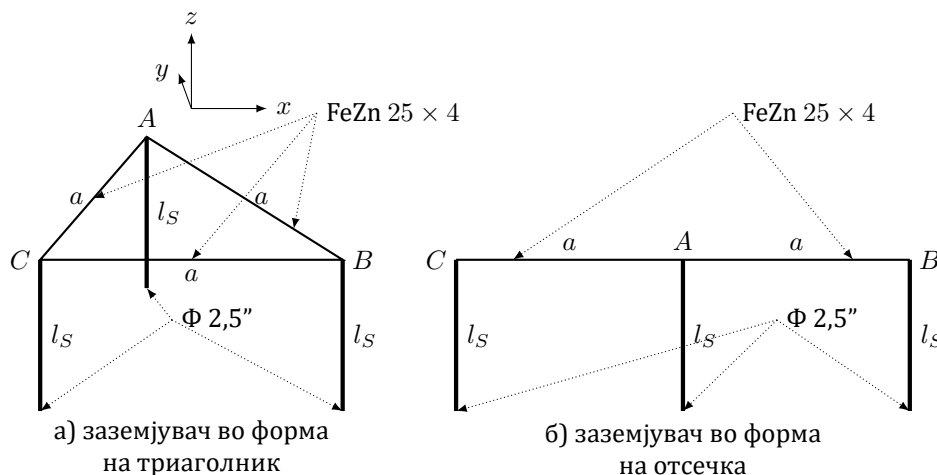
R_Z . Таа најмногу влијае врз обликувањето на потенцијалот во и околу ТС и ги смалува потенцијалните разлики на допир за повеќе од два пати.

Во принцип, ако контурите од заземјувачот се на различни длабочини, средната контура може и да се изостави без тоа битно да се одрази врз големината на потенцијалната разлика E_d .

Кај столбната ТС потенцијалните разлики на чекор се поголеми од оние на допир и се пресудни при димензионирањето на заземјувачите. Со оддалечувањето на прстените од столбот на столбната ТС обликувањето на потенцијалот се влошува.

6.2 Работни заземјувачи на ТС СН/НН

Во нашата дистрибутивна практика е вообичаено ѕвездиштето од НН намотка на дистрибутивните трансформатори во ТС СН/НН да биде директно заземјено. Самиот заземјувач преку кој се врши тоа заземјување, наречен работен заземјувач (РЗ), најчесто се изведува според скицата на слика 6.7а. Се состои од еден хоризонтален триаголник (најчесто рамностран) изведен од поцинкувани челични ленти ($\text{FeZn } 30 \times 4$), а понекогаш и од бакарно јаже $\text{Cu } 35$ или $\text{Cu } 50 \text{ mm}^2$, закопан на извесна длабочина $h = 0,7 \div 0,8 \text{ m}$, и три вертикални сонди со должини $l_S = 2 \div 3 \text{ m}$, од челични поцинкувани цевки $\Phi 2,5''$ ($63,5 \text{ mm}$) поставени во темињата на триаголникот. Се среќаваат и други негови форми или модификации како, на пример, случаите: рамнокрак триаголник, случај кога триаголникот е дегенериран во отсечка (слика 6.7б), триаголник без вертикални сонди и други.



Слика 6.7. Работен заземјувач на ТС СН/НН

6.2.1 Избор на форма и димензии на работниот заземјувач

Еден од проблемите со кои се среќаваат проектантите при проектирањето или реконструкцијата на ТС СН/НН и нивните заземјувачи е следниов: при однапред познати карактеристики на тлото во кое тие ќе бидат поставени, да се изврши најсоодветен избор на обликот и димензиите, водејќи притоа сметка за наметнатите локални ограничувања и исполнувањето на критериумите за безопасност, дефинирани со нашите прописи. Проблемот е особено актуелен за урбаните средини и индустриски подрачја каде што заради недостаток на слободен простор, постоењето на станбени и други објекти, присуство на метални инсталации во земјата, (на пример водоводна или канализациона мрежа), не е можно да се реализира замислениот РЗ (рамностран триаголник), па мора да се извршат отстапувања од неговата стандардна форма.

Со помош на програма се вршени детални анализи на влијанието на формата и димензиите на работниот заземјувач врз вредноста на неговата отпорност на распростирање R_Z . Во табелата 6.4 како и на сликата 6.8??? се прикажани резултатите од пресметките на специфичната отпорност \mathfrak{R}_Z на работниот заземјувач според скицата од сликата 6.7, поставен во хомогена средина со специфична отпорност $\rho = 100 \Omega\text{m}$. Во табелата со $I_S(\%)$ е означено процентуално учество на струјата на одведување од вертикалните сонди.

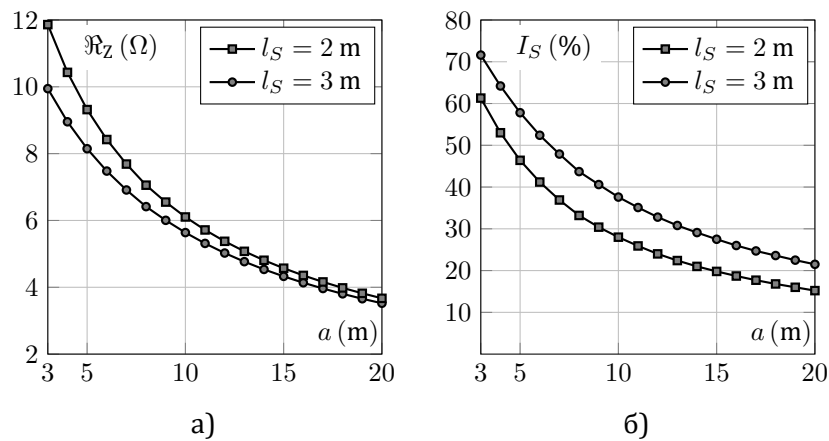
За вредности на специфичната отпорност на земјиштето $\rho \neq 100 \Omega\text{m}$, отпорноста на распростирање на заземјувачот ќе биде

$$R_Z = \mathfrak{R}_Z \cdot \frac{\rho}{100}.$$

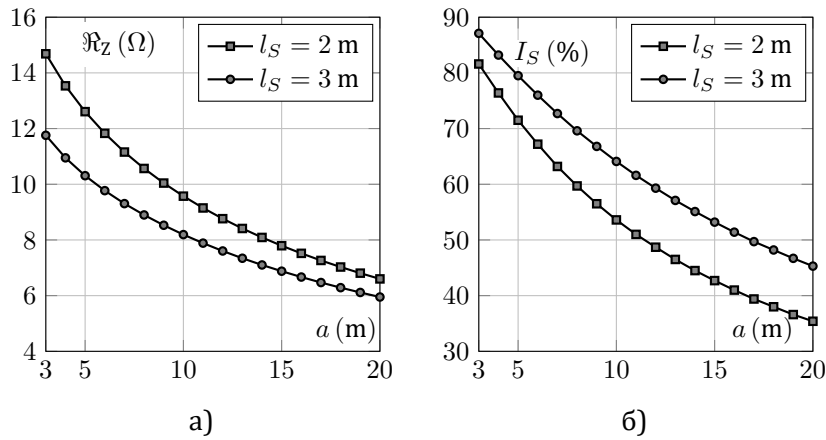
Анализите на голем број примери покажуваат дека обликот на триаголникот од сликата 6.7а е малку влијателен врз големината на отпорноста на работниот заземјувач, односно дијаграмот од сликата 6.8 важи (со сосема мали отстапувања од само неколку проценти) и за случаите кога место во форма на рамностран триаголник со страница a , работниот заземјувач е изведен во форма на разностран триаголник но со ист периметар како и рамностраниот ($L_\Sigma = 3a$). Исклучок се прави само во случајот кога триаголникот е дегенериран во отсечка, (табела 6.8 и дијаграм од слика 6.7б). Значи рамностраниот триаголник со страна може да се замени со разностран триаголник со периметар $L_\Sigma = 3a$ или, пак, со отсечка со должина $L_\Sigma = 2a$.

Табела 6.4. Карактеристики на работен заземјувач во форма на рамностран триаголник со страница a и во форма на отсечка (дегерериран триаголник) со должина $2a$

a (m)	рамностран триаголник со страна a				отсечка со должина $a + a = 2a$			
	$l_S = 3\text{ m}$		$l_S = 2\text{ m}$		$l_S = 3\text{ m}$		$l_S = 2\text{ m}$	
	$\Re_Z(\Omega)$	$I_S(\%)$	$\Re_Z(\Omega)$	$I_S(\%)$	$\Re_Z(\Omega)$	$I_S(\%)$	$\Re_Z(\Omega)$	$I_S(\%)$
3	9,945	71,6	11,861	61,3	11,758	87,1	14,685	81,6
4	8,953	64,2	10,432	53,0	10,949	83,2	13,535	76,4
5	8,147	57,8	9,318	46,4	10,308	79,5	12,608	71,5
6	7,478	52,4	8,422	41,2	9,771	76,0	11,829	67,2
7	6,912	47,9	7,688	36,9	9,305	72,7	11,157	63,2
8	6,414	43,7	7,056	33,2	8,898	69,6	10,567	59,7
9	6,004	40,6	6,550	30,4	8,528	66,8	10,043	56,5
10	5,637	37,6	6,104	28,0	8,192	64,1	9,573	53,6
11	5,313	35,1	5,716	25,9	7,886	61,6	9,149	51,0
12	5,025	32,8	5,376	24,0	7,604	59,3	8,764	48,7
13	4,767	30,8	5,076	22,4	7,343	57,1	8,412	46,5
14	4,535	29,1	4,809	21,0	7,102	55,1	8,090	44,5
15	4,327	27,5	4,571	19,8	6,878	53,2	7,793	42,7
16	4,136	26,0	4,355	18,7	6,668	51,4	7,519	41,0
17	3,963	24,7	4,160	17,7	6,471	49,7	7,264	39,4
18	3,804	23,6	3,982	16,8	6,287	48,2	7,028	38,0
19	3,657	22,5	3,820	16,0	6,114	46,7	6,808	36,6
20	3,522	21,5	3,670	15,2	5,951	45,3	6,601	35,4



Слика 6.8. Специфична отпорност и учество на сондите во одведувањето на струјата кај работен заземјувач во форма на рамностран триаголник



Слика 6.9. Специфична отпорност и учество на сондите во одведувањето на струјата кај работен заземјувач во форма на отсечка

Вообичаена практика е, во селските и во приградските населби, каде што најчесто постојат услови за ефикасно одвојување на работниот од заштитниот заземјувач, тие галвански да се одвојат еден од друг, како што е тоа прикажано на сликата 6.1. Тоа се прави за да се избегне можноста при дефект во СН мрежа висок потенцијал од ЗС на СН мрежа да се изнесе, преку неутралниот спроводник, во НН мрежа.

Со Препораката [11] се предвидува отпорноста на распростирање на работниот заземјувач да биде $R_Z < 5 \Omega$. Оваа вредност сама по себе не е доволно ниска за да се отстрани опасноста од појава на превисок потенцијал на неутралниот спроводник во случај на дефект или силна несиметрија во НН мрежа. Но ако се земе предвид и присуството на неутралниот спроводник кој што се заземјува на повеќе места во НН мрежа, а се врши негово заземјување дури и кај самите потрошувачи, тогаш може да се очекува дека во реални услови проблеми со појавата на превисок потенцијал на нулата во НН мрежа ќе бидат малку веројатни.

Кај ТС СН/НН што се напојуваат преку СН кабелска мрежа, Препораката [11] предвидува задоволување на условот $R_Z < 10 \Omega$ бидејќи, како што ќе видиме подоцна, присуството на СН напоен кабел (кабли) ги олеснува условите на заземјување.

Во [17] се вршени пресметки и анализи на работен заземјувач поставен во двослојна средина со бројни комбинации на специфичните отпорности ρ_1 , ρ_2 и дебелината на горниот слој H . Тие покажуваат дека претходно изложените заклучоци во поглед на формата важат и во случајот на двослој. Покрај тоа отпорноста на распростирање на R_Z може да се искаже на едноставен начин како производ од вредноста

R_1 , добиена под претпоставката дека е тлото хомогено со специфична отпорност ρ_1 , и еден корекционен фактор c_ρ

$$R_Z = c_\rho \cdot R_1$$

Вредноста на факторот c_ρ зависи од односот $k = \rho_2/\rho_1$, и од дебелината на горниот слој H , а не зависи скоро воопшто од димензиите и формата на заземјувачот. Оваа вредност, за разни вредности на односот k , може да се отчита од дијаграмите прикажани во [17].

Релацијата (6.3) овозможува и едноставно решавање на обратната задача: определување на формата и димензиите на работниот заземјувач за однапред дефинирана вредност на отпорноста на распростирање на заземјувачот R_Z .

6.3 Заземјување на ТС ВН/ВН и ТС ВН/СН

Во ТС ВН/ВН односно ВН/СН заземјувањето на опремата се врши со *мрежести заземјувачи*, т.е. од хоризонтално закопана мрежа составена од поголем број паралелни и заемно нормални електроди (јажиња односно ленти), закопани на длабочина од 0,5 до 1 m. Често пати, заради подобрување на перформансите на заземјувачот, а особено тогаш кога земјиштето во кое што е тој поставен слоевито и притоа долните слоеви земја имаат поголема електричка спроводност од горните слоеви, кон основниот, мрежест, заземјувач се додаваат и вертикални елементи – сонди со определена должина l_S избрана така што поголемиот дел од сондите да лежи во долниот поспроводен слој земја.

Просторот што зафаќаат мрежестите заземјувачи е значително поголем од просторот потребен за изведба на ТС СН/СН и ТС СН/НН и се движи од неколку декари до неколку хектари. Обликот и димензиите на заземјувачот зависат од расположливиот простор, распоредот на опремата и другите уреди во постројката што треба да се заземјат. Со изборот на обликот на заземјувачот проектантот се стреми да постигне најмала преодна отпорност на заземјување и што е можно поповолно обликување на потенцијалите по површината на земјата над и во околината на заземјувачот така што се добијат помали напони на допир и чекор. Се разбира, при сето тоа треба да се води сметка уште и за економичноста на решението, т.е. за цената на чинење на заземјувачот.

Кај мрежестите заземјувачи е потребно сите метални маси од опремата, уредите и другите елементи на постројката што се наоѓаат во подрачјето на заземјувачот да се наоѓаат во неговата внатрешност, т.е. во внатрешноста од периферната контура на заземјувачот, на растојание од најмалку 1 m од неа, сметано во хоризонтален правец.

Вертикалните сонди, кои што се нарекуваат уште и „стапни заземјувачи“, се поставуваат строго вертикално, најчесто со набивање. Нивната примена е оправдана кога долните слоеви земја имаат значително помала специфична отпорност од горните слоеви. Ако е предвидено поставување на поголем број вертикални сонди тогаш тие треба да бидат меѓусебно оддалечени најмалку онолку колку што е нивната двојна должина заради избегнување на ефектот на заемно „екранирање“ и нивно поефикасно искористување.

Сите елементи (електроди) од заземјувачот треба да бидат во добар електричен контакт со тлото во кое што се положени. Кога земјиштето е чакал или, пак, е каменито, во рововите за полагање на елементите од заземјувачот се поставува ситна просеана добро спроводна земја (хумус, глина и сл.) или некој друг добро спроводен материјал (нпр. бентонит) така што електродата да лежи во дополнително поставениот материјал и да остварува добар електричен контакт со него без можност за појава на шуплини.

6.3.1 Пресметка на карактеристичните величини на заземјувачот – практични изрази

Карактеристичните величини на мрежестите заземјувачи без и со вертикални елементи – сонди, можат да се решаваат со помош на компјутер (компјутерска симулација) но исто така и со помош на разни емпириски или полуемпириски формули, што е многу попрактично. Најнапред ќе се запознаеме со некои од нив кои овозможуваат пресметка (проценка) на вредностите на отпорноста на распростирање R_Z и на потенцијалните разлики на допир $E_{d,max}$ и чекор $E_{c,max}$. Покрај класичните, добро познати, формули на Лорен (Laurent), Шварц (Schwartz) и др., кои веќе подолго време се употребуваат во проектанската практика, овде ќе бидат изложени и формули кои се резултат на најновите истражувања и како такви се попрецизни од претходните – класични, формули. Но пред да преминеме на тие формули, заради нивна поедноставна примена, ќе направиме список на ознаките со соодветните значења на одделните променливи што фигурираат во нив. Сите величини што фигурираат во формулите се изразуваат во соодветните единици на SI – системот.

Емпириски релации за пресметка на основните карактеристики

Список на користените ознаки со нивни значења

- A површина што ја покрива (опфаќа) заземјувачот;
- N вкупен број на окца во мрежата од мрежестиот заземјувач;

n	број на паралелни електроди во еден правец. Во случајот кога броевите на елементите n_1 и n_2 во одделните правци се различни, за n се зема нивната геометриска средина, т.е. $n = \sqrt{n_1 \cdot n_2}$;
d	пречник на спроводниците од мрежата;
ρ	специфична отпорност на тлото;
ρ_1, ρ_2	специфична отпорност на горниот односно долниот слој земја кај двослојните средини;
H	дебелина на горниот слој земја кај двослојните средини;
h	длабочина на закопување на мрежата;
D	просечно растојание помеѓу соседните елементи во мрежата $D = \sqrt{A/N}$;
L_P	вкупна должина на периметарот на хоризонталната мрежа;
L_Σ	вкупна должина на хоризонталните елементи од мрежата;
l_S	должина на една вертикална сонда;
$L_{\Sigma B}$	вкупна должина на вертикалните сонди;
n_V	вкупен број на вертикалните елементи (сонди) во мрежата;
I_Z	струја којашто се одведува во земјата од заземјувачот;
R_Z	отпорност на распростирање на заземјувачот, поставен во хомогено тло;
$R_Z^{(n)}$	отпорност на распростирање на заземјувачот, поставен во нехомогено тло;
E_m	максимална потенцијална разлика на допир ($E_m = E_{d,max}$);
$E_m^{(n)}$	максимална потенцијална разлика на допир за случај кога тлото е двослој;
E_c	максимална потенцијална разлика на чекор ($E_c = E_{c,max}$);
$E_c^{(n)}$	максимална потенцијална разлика на чекор за случај кога тлото е двослој;

Во натамошниот текст ќе бидат наведени повеќе формули за пресметка на отпорноста на распростирање на сложените мрежести заземјувачи, заедно со потребните придружни коментари. Во некои од нив не се опфатени некои важни конструктивни параметри на заземјувачот како што се, на пример, длабочината на вкопување, обликот и димензиите на напречниот пресек на електродите од заземјувачот, димензиите на окцата од мрежата и др. Тоа ги прави поедноставни за примена, но истовремено и помалку точни.

6.3.2 Формули за пресметка на отпорноста на распростирање на мрежестиот заземјувач R_Z

1. Формула базирана на еквиваленција на мрежата со еквивалентна кружна плоча

$$R_Z = 0,443 \cdot \frac{\rho}{\sqrt{A}}. \quad (6.1)$$

2. Формула на Лоран (Laurent)

$$R_Z = 0,443 \cdot \frac{\rho}{\sqrt{A}} + \frac{\rho}{L_\Sigma}. \quad (6.2)$$

3. Формула на Шверак (Sverak)

$$R_Z = \rho \cdot \left[\frac{1}{L_\Sigma} + \frac{1}{\sqrt{20A}} \left(1 + \frac{1}{1 + h \cdot \sqrt{20/A}} \right) \right] \quad (6.3)$$

4. Формула на Тапар (Thapar) [6]

$$R_Z = \rho \cdot \left[\frac{1}{L_\Sigma} + \frac{1}{\sqrt{20A}} \left(1 + \frac{1}{1 + h \cdot \sqrt{20/A}} \right) \right] \cdot 1,52 \cdot \left[2 \ln \left(L_p \sqrt{\frac{2}{A}} \right) - 1 \right] \cdot \frac{\sqrt{A}}{L_p} \phi \quad (6.4)$$

5. Формула на Нахман [5]

$$R_Z = 0,13 \cdot \frac{\rho}{\sqrt{A}} \log_{10} \left(\frac{2400 \cdot \sqrt{A}}{N} \right) \cdot \left(1 - 0,45 \cdot \frac{l_S}{\sqrt{A}} \right), \quad (6.5)$$
$$\frac{l_S}{\sqrt{A}} \leq 0,2.$$

Формулите (6.1) – (6.5) се наведени по „старост“. Постојат и мноштво други, помалку или повеќе успешни, формули за пресметување на отпорноста на заземјувачот R_Z .

Формулата (6.1) е наједноставна и дава основна информација за највлијателните параметри на геометријата на заземјувачот врз вредноста на отпорност R_Z . Базира на еквивалентирање на мрежестиот заземјувач со кружна плоча која зафаќа иста површина A како и реалниот заземјувач. Дава секогаш помали вредности од вистинските.

Формулата (6.2) е познатата Лоранова формула. Таа, пак, секогаш дава вредности за R_Z нешто поголеми од вистинските. Кај пространите мрежести заземјувачи разликата е занемарливо мала.

Формулата на Шверак (6.3) е исто така познатата класична формула, која се користи прилично во проектантската практика. Дава добри резултати во случаите кога заземјувачот има правилна, квадратни или правоаголна форма.

Формулата (6.4) на Тапар и Герез (Gerez), пак, може да се користи и за случаите кога заземјувачот има неправилна L-форма, T-форма и слично. Меѓутоа во случајот кога заземјувачот има и вертикални елементи таа станува скоро неприменлива. Во тој случај може да се употребува релацијата на Нахман (6.5) преземена од [5].

Формули за пресметка на максималната потенцијална разлика на допир

$$E_m = \rho \cdot K_m \cdot K_{im} \cdot \frac{I_Z}{L_{em}} = \rho \cdot K_m \cdot K_{im} \cdot \frac{I_Z}{L_{\Sigma} + 1,15 \cdot L_{\Sigma V}}, \quad (6.6)$$

$$K_m = \frac{1}{2\pi} \left[\ln \left(\frac{D^2}{16hd} + \frac{(D+2h)^2}{8Dd} - \frac{h}{4d} \right) + \frac{K_{ii}}{K_h} \ln \left(\frac{8}{(2n-1)\pi} \right) \right], \quad (6.7)$$

$$K_{ii} = (2n)^{-(n/2)}, \quad \text{за мрежи со вертикални сонди } K_{ii} = 1, \quad (6.8)$$

$$K_h = \sqrt{1+h}, \quad (6.9)$$

$$K_{im} = 0,656 + 0,172 \cdot n. \quad (6.10)$$

Формули за пресметка на максималната потенцијална разлика на чекор

$$E_c = \rho \cdot K_c \cdot K_{ic} \cdot \frac{I_Z}{L_{ec}} = \rho \cdot K_c \cdot K_{ic} \cdot \frac{I_Z}{L_{\Sigma} + 2 \cdot L_{\Sigma V}}, \quad (6.11)$$

$$K_c = \frac{1}{\pi} \cdot \left[\frac{1}{2h} + \frac{1}{D+h} + \frac{W}{D} \right], \quad (6.12)$$

$$K_{ic} = 0,94 + 0,047 \cdot n, \quad (6.13)$$

$$W = 0,5 + 0,9 \cdot \ln \frac{n-1}{2}, \quad W = 0 \text{ за } n = 2. \quad (6.14)$$

6.3.3 Случај кога мрежестиот заземјувач е закопан во двослој со параметри ρ_1 , ρ_2 и H

Досегашните формули (6.1) ÷ (6.5) се однесуваа на случајот кога мрежестиот заземјувач е закопан во хомогено тло со специфична отпорност ρ . Но многу често земјиштето не е хомогено туку слоевито, така тогаш тие формули нема повеќе да важат. Во таквите случаи обично се прибегнува кон еквалентирање на повеќеслојното земјиште

со еквивалентен двослој со параметри ρ_1 , ρ_2 и H . За тој случај важат следните формули.

Формули за пресметка на отпорноста на распростирање на мрежестиот заземјувач $R_Z^{(n)}$

1. случај кога мрежестиот заземјувач има правоаголен облик

$$R_Z^{(n)} = C_\rho \cdot R_Z = \left(\frac{\rho_2}{\rho_1}\right)^x \cdot R_Z, \quad (6.15)$$

$$x = 0,14 \cdot \log\left(\frac{44N\sqrt{A}}{H^2}\right); \quad 0,2 \leq \frac{\rho_2}{\rho_1} \leq 1 \quad (6.16)$$

$$x = 0,12 \cdot \log(3160N\sqrt{A}) - 0,2 \cdot \log H \cdot \log \frac{1000}{\sqrt{A}}; \quad 1 \leq \frac{\rho_2}{\rho_1} \leq 5 \quad (6.17)$$

2. случај кога мрежестиот заземјувач има вертикални елементи, распоредени по неговата периферија

$$R_Z^{(n)} = C_R \cdot R_Z = \left(\frac{\rho_2}{\rho_1}\right)^{0,76} \cdot R_Z; \quad \rho_2 < \rho_1 \quad (6.18)$$

Формули за пресметка на максималната потенцијална разлика на допир

$$E_m^{(n)} = C_m \cdot E_m = \left(\frac{\rho_2}{\rho_1}\right)^x \cdot E_m \quad (6.19)$$

$$x = 0,042 \cdot \log(3,53 \cdot H) \cdot (\log N)^2 - \frac{1}{2} \cdot \log \frac{H}{6}; \quad \rho_2 < \rho_1 \quad (6.20)$$

$$x = 0,12 \cdot \log(N \cdot \sqrt{A}) - 0,16 \cdot \log(4,6 \cdot H); \quad \rho_2 > \rho_1 \quad (6.21)$$

Формули за пресметка на максималната потенцијална разлика на чекор

$$E_c^{(n)} = C_c \cdot E_c = \left[1 + 0,7 \cdot \log\left(\frac{\rho_2}{\rho_1}\right)\right] \cdot E_c \quad (6.22)$$

6.3.4 Осврт кон прописите и препораките за изведување на заземјувањето на ТС ВН/СН

При димензионирањето на мрежестите заземјувачи на ТС ВН/ВН и ТС ВН/СН, во досегашната практика, покрај уважувањето на соодветните прописи [1], многу често се експлоатираше и техничката препорака ТП 23 [10], која базира на соодветни германски (VDE) прописи и препораки. Со оваа препорака некои од непознатите, а кои секогаш ги има кога се проектира нешто ново и непостоечко, се усвојуваат така што решението

што ќе се добие на база на тие претпоставени вредности за непознатите ќе биде на страната на сигурноста. Така, на пример, според Препораката ТП 23, се усвојува дека вкупното времетраење на грешката изнесува 0,25 s. од каде што произлегува, во согласност со постојните прописи и Препораката ТП-23, дека максималниот дозволен напон на допир во постројката за време на траење на грешката од $t = 0,25$ s изнесува $U_{d.doz} = 230$ V, односно треба да важи

$$E_d \leq E_{d.doz} = 230 + 0,34 \cdot \rho_p \quad (6.23)$$

За да се контролира и одржува напонот на допир под оваа вредност потребно е да се преземат повеќе мерки, од кои повеќето се детално опишани во [10]. Еве некои од нив.

Според една од тие мерки, обликот и димензиите (густината на окцата) на заземјувачката мрежа мора да одговара на распоредот на полињата во постројката, положбата на апаратите, фундаментите и носачите на опремата. Со оваа мерка, исто така, се предвидува на заземјувачот на постројката да се поврзат сите метални делови од опремата, сите погонски заземјувања, металните плаштеви и арматури на кабли, земјоводните јажиња од приклучните надземни воводи, громобранското заземјување и слично.

Металните делови на погонските средства што не припаѓаат на струјните кругови, а кои во случај на грешка можат да дојдат под напон (оградите и мрежите околу одделните апарати и постројки, цевководи, арматури и сл.) исто така треба да бидат поврзани со заземјувачот од постројката.

Околу темелите на зградите и објектите во постројката (командно-погонски, работилници, магацини и сл.) е потребно да се постави прстен на растојание од 1 до 2 m од темелот на зградата, на длабочина 0,5 m. така што да го следи нејзиниот габарит. Тој прстен, исто така, треба да се поврзе со мрежестиот заземјувач на постројката.

Надворешните метални огради треба од заземјувачот на постројката да бидат оддалечени за најмалку 2 m. Тие не смеат галвански да се поврзуваат на заземјувачот на постројката бидејќи со тоа би се довеле на негов потенцијал. Од надворешната страна на оградата се полага заземјувач на растојание 1 m од оградата, на длабочина од 0,5 m, кој галвански се поврзува за оградата со што се постигнува подобро обликување на потенцијалот во близината на оградата – гледано од надворешна страна.

Покрај овие мерки, во самата ТС ВН/СН се практикува изолирање на потенцијално опасните места околу оградата со поставување на изолационен слој асфалт со дебелина 1 cm, или пак слој чакал со

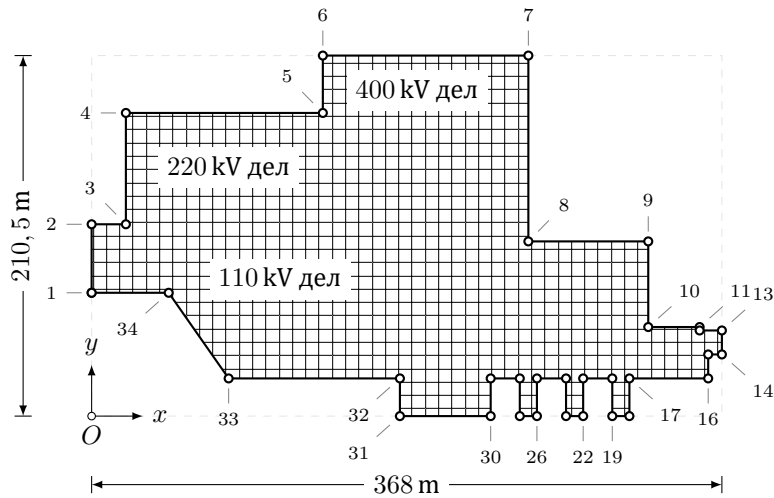
дебелина сса 10 cm и со ширина најмалку 1,25 m. Истовремено металните плаштеви и арматурите на каблите кои излегуваат од постројката се прекинуваат на местата каде што го напуштаат објектот и се изолираат со изолациони вметоци. Цел на овие мерки, според препораката [10], е напонот на допир надвор од оградата да е помал од $U_d = 115 \text{ V}$ – вредност што и соодветствува на времето на исклучување на грешката $t = 0,25 \text{ s}$.

Земјоводните јажиња и хоризонталните елементи на заземјувачот, по правило, треба да се изведуваат од бакарно јаже додека, пак, вертикалните елементи (сонди) од челични поцинкувани цевки. Земјоводите во командната зграда како и земјоводите и заземјувачите на металните огради на постројката, по правило, се од поцинкуван челик. Пресекот на спроводниците на земјоводите, на собирните земјоводи и на заземјувачот од постројката треба да се димензионира од термички аспект според вкупната струја на земјоспој во транзиентен период со време на траење на грешката од 1 s.

6.3.5 Пресметка на мрежестите заземјувачи на ТС ВН/СН со компјутерска симулација

Емпириските релации (6.1) ÷ (6.5) се едноставни и практични за примена. Со нивна помош брзо се доаѓа до приближно, но сепак доволно точно, решение. Во секој случај, како најточна се покажува компјутерската симулација базирана на компјутерски програми кои вршат директно решавање на Максвеловите равенки (Глава 2). Со неа можат најточно да се пресметаат сите карактеристики на мрежестиот заземјувач, почнувајќи од параметрите на заземјувачот R_Z , $E_{d,max}$, $E_{c,max}$, па сè до распределбата на струите на одведување во земјата од одделните негови елементи, распределбата на потенцијалите по површината од земјата и друго.

Како илустрација на примената на обете постапки нека послужи конкретен пример на постојната ТС 220/110/35 kV Скопје 1, заедно со актуелното проширување со новиот, 400 kV, дел на ТС 400/110/35 kV Скопје 5, извршено во текот на 2004 година. Мрежестиот заземјувач на трафостаницата има сложена и неправилна форма, прикажана на сликата 6.10, а координатите на точките се дадени во табелата 6.5. Изведен е со Cu јаже 70 mm^2 , поставено на длабочина 0,8 m. Во проектот е проценето дека специфичната отпорност на тлото во реонот на самата ТС изнесува $\rho = 100 \Omega\text{m}$.



Слика 6.10. Заземјувач на ТС 220/110/35 kV Скопје 1 по проширување со 400 kV дел – Скопје 5

Табела 6.5. Точки на заземјувачот во ТС Скопје 5

координати изразени во метри			
$T_1 (0, 72)$	$T_{10} (325, 52)$	$T_{19} (304, 0)$	$T_{28} (250, 22)$
$T_2 (0, 112)$	$T_{11} (355, 52)$	$T_{20} (304, 22)$	$T_{29} (233, 22)$
$T_3 (20, 112)$	$T_{12} (355, 50)$	$T_{21} (287, 22)$	$T_{30} (233, 0)$
$T_4 (20, 177)$	$T_{13} (368, 50)$	$T_{22} (287, 0)$	$T_{31} (180, 0)$
$T_5 (135, 177)$	$T_{14} (368, 36)$	$T_{23} (277, 0)$	$T_{32} (180, 22)$
$T_6 (135, 210.5)$	$T_{15} (360, 36)$	$T_{24} (277, 22)$	$T_{33} (80, 22)$
$T_7 (255, 210.5)$	$T_{16} (360, 22)$	$T_{25} (260, 22)$	$T_{34} (45, 72)$
$T_8 (255, 102)$	$T_{17} (314, 22)$	$T_{26} (260, 0)$	
$T_9 (325, 102)$	$T_{18} (314, 0)$	$T_{27} (250, 0)$	

Врз основа на тие податоци е направена пресметка на R_Z на мрежестиот заземјувач на постројката на неколку начини. Резултатите од пресметките се прикажани во следната табела.

Табела 6.6. Отпорност на распространување на мрежестиот заземјувач пресметана на повеќе начини

проект	релација (6.3)	релација (6.5)	компјутерска симулација
$R_Z = 0, 187 \Omega$	$R_Z = 0, 192 \Omega$	$R_Z = 0, 189 \Omega$	$R_Z = 0, 190 \Omega$

Заземјувачи и заземјувачки системи во електроенергетските мрежи

Компјутерски симулации на неколку карактеристични примери ќе се изведуваат во рамките на лабораториските вежби, со примена на програмата во Matlab.

7

НАДЗЕМЕН ВОД КАКО ЕЛЕМЕНТ ОД ЗАЗЕМЈУВАЧКИОТ СИСТЕМ НА ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТСКИТЕ МРЕЖИ

7.1 Општо

Столбовите од надземните електроенергетски водови се заземјуваат со сопствени заземјувачи. Самите заземјувачи на столбовите беа детално обработени во четвртата глава. Заземјување на столбовите се врши, како што веќе беше кажано претходно, од две причини: 1) за да се спроведе во земјата струјата од громот при директните атмосферски празнења во надземниот вод и 2) струјата на земјоспој да се спроведе во земјата без притоа да се јават кај столбовите опасни потенцијални разлики.

Надземните водови за среден и висок напон ($U_n \geq 35 \text{ kV}$) по правило се изведуваат на челично-решеткасти столбови. Кај таквите столбови, со оглед на нивната важност, се предвидува и заштита од директните удари на громот со помош на *заштитно т.е. земјоводно јаже*. Заштитното јаже се поставува на врвот од столбот за да може да ја оствари својата заштитна функција. Тоа обично се прави од челик, бидејќи во нормални услови во него не тече струја, па не е битно колкава е неговата електрична отпорност. Попрецизно кажано, струја во него ќе тече секогаш, дури и во нормални услови на работа, кога фазните погонски струи образуваат трифазен симетричен систем, поради постоењето на геометриската несиметрија на одделните фази во однос на заштитното јаже. Но таа струја во јажето е обично сосема мала, од редот на големина на неколку ампери, па дури и помалку така што, гледно од аспект на загубите, таа може слободно да се занемари. Но во услови на земјоспој (еднофазна куса врска) струјата во заштитното јаже достигнува вредност од 40 до 50% од самата струја на грешката и тогаш таа

може да добие вредности од неколку стотини ампери па сè до неколку килоампери.

Толкави големи струи предизвикуваат нагло загревавање на јажето – во делот од секундата. Кога се работи за челично јаже, чија отпорност по километар должина r_{zj} е од редот на големина на неколку Ω/km , тогаш и за многу кусо време може јажето термички да се преоптовари (прегрее) и да добие недозволена висока температура која ќе му ги смени (влоши) неговите механички својства. Во такви услови место од челик, заштитното јаже се изведува од бронза или, пак, како што е тоа кај нас вообичаено, од комбинацијата алуминиум - челик, во форма на класично комбинирано алучел јаже, составено од челично јадро (срце) и алуминиумова обвивка (плашт). Кај водовите со највисок напон ($U_n \geq 400 \text{ kV}$), пак, од причини на сигурност, кај нас се применува специјално решение за заштитното јаже – т.н. биметално јаже. Тоа е изработено од жици коишто се состојат од челична срцевина во внатрешниот дел околу која по пат на електролиза е нанесен слој од алуминиум со определена дебелина (т.н. „алумовелд“ (alumoweld) јаже). Има и решенија со т.н. копервелд (copergweld) жици на јажето каде што нанесениот спроводен слој е изведен од електролитски нанесен бакар, но таквите решенија се поскапи и кај нас не се користат.

Заземјувачите од столбовите на надземните водови, заедно со заштитното јаже, формираат еден заземјувачки систем бидејќи тие се галвански поврзани на секое столбно место. Таквиот заземјувачки систем претставува дел од целосниот заземјувачки систем на мрежата и има определено влијание врз состојбата (струи, напони) во ЗС на електроенергетскиот систем. Затоа, во наредниот дел од текстот ќе го проучиме заземјувањето на надземниот вод посматрано како еден распределен заземјувач, како дел од ЗС на целиот ЕЕС.

7.2 Идеализиран модел на заземјувачкиот систем на надземен вод

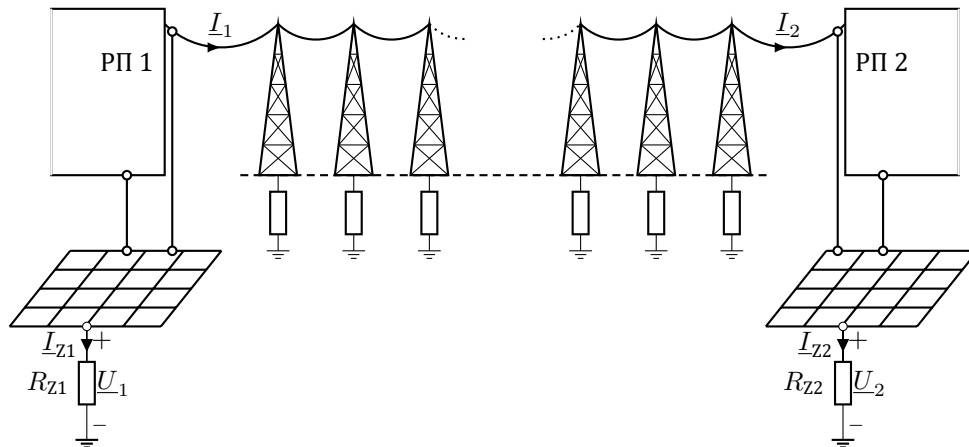
7.2.1 Напони и струи на заштитното јаже

Ќе посматраме надземен вод којшто поврзува две разводни постројки „1„ и „2„, како што е тоа прикажано на сликата 7.1. Ќе претпоставиме дека водот е изведен со заштитно јаже по целата своја должина.

Ако во постројката „1„ дојде до земјоспој, тогаш на заземјувачот од таа постројка ќе се јави некаков потенцијал U_1 (во однос на референтната земја) поради што во заштитното јаже ќе протече струја I_1 кон постројката „2„. Односот на напонот U_1 и струјата I_1 ја претставува

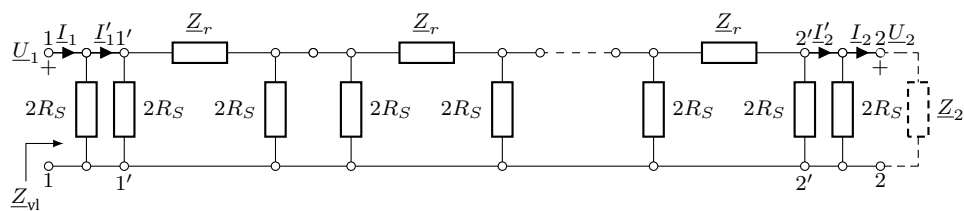
импеданцијата на заземјување на надземниот вод, т.е. „влезната импеданција“, на водот

$$\underline{Z}_{vl} = \frac{U_1}{I_1} \quad (7.1)$$



Слика 7.1. Надземен вод како елемент на заземјувачкиот систем

Тогаш во постројката „2,, по заштитното јаже ќе влезе струјата I_2 која на импеданцијата на заземјувањето \underline{Z}_2 ќе го воспостави напонот U_2 (слика 7.1). Тука треба да се нагласи дека импеданцијата на заземјување на постројката „2,, \underline{Z}_2 се состои од паралелна врска од отпорноста на распростирање на заземјувачот во РП2 R_{Z2} и еквивалентните (влезните) импеданции на сите надземни водови и кабли што се приклучени во постројката „2,, освен набљудуваниот.



Слика 7.2. Шема на заземјувачкиот систем на водот од сликата 7.1

Заемната релација помеѓу паровите (U_1, I_1) и (U_2, I_2) може да се анализира преку електричната шема прикажана на сликата 7.2. Во оваа шема се посматра идеализираниот случај кога сите распони од водот, кои ги има вкупно n , се со иста должина и сите столбови имаат заземјувач со иста отпорност на распростирање R_S . Тоа го правиме за да можеме да ги изведеме општите изрази за споменатата врска помеѓу приликите во

ЗС на почетокот и на крајот од надземниот вод, кои, како што ќе видиме подоцна, ќе ни овозможат проучување на перформансите и поведението и на реалните заземјувачки системи од надземните водови.

Во оваа шема не е земена предвид активната отпорност на земјата помеѓу одделните столбни места бидејќи, иако постои, таа е занемарливо мала во однос на отпорностите R_S на самите столбови од надземниот вод. Неа можеме да ја опфатиме приближно на тој начин што вештачки ќе ја зголемиме активната отпорност на импеданцијата на заштитното јаже во распонот \underline{Z}_r , иако во разгледуваниот модел од причини на упростување тоа не е направено.

Ако со a ја означиме должината на еден распон, тогаш импеданцијата на распонот \underline{Z}_t , која што фигурира во колото од сликата 7.2, ќе биде

$$\underline{Z}_r = \underline{z} \cdot a = (r + jx) \cdot a, \quad (7.2)$$

каде што

$$r = \frac{1000}{\kappa_{zj} \cdot A_{zj}} = \frac{1000 \cdot \rho_{zj}}{A_{zj}} \left(\frac{\Omega}{\text{km}} \right), \quad (7.3)$$

$$x = 0,1445 \cdot \log \frac{2D_{ek}}{d_{zj}} + 0,0157 \cdot \mu_r \left(\frac{\Omega}{\text{km}} \right). \quad (7.4)$$

Во релациите (7.3) и (7.4) се воведени следните означувања

- ρ_{zj}, κ_{zj} активна отпорност и активна спроводност по km должина на заштитното јаже;
- A_{zj} напречен пресек на заштитното јаже, (mm²);
- d_{zj} пречник на заштитното јаже, (m);
- μ_r релативна пермеабилност на спроводниот дел од заштитното јаже (во практичните пресметки се зема $\mu_r = 1$, освен за челикот, за кој што кога е во заситена состојба се зема $\mu_r = 30$);
- D_{ek} еквивалентно растојание помеѓу заштитното јаже и фиктивниот спроводник со којшто се заменува влиајнието на повратните струи во земјата. Се покажува дека ова растојание зависи од фреквенцијата на струјата f од специфичната отпорност на теренот над којшто минува надземниот вод. Се пресметува со помош на следната релација.

$$D_{ek} = 658 \cdot \sqrt{\frac{\rho}{f}}, \quad (\text{m}). \quad (7.5)$$

Од сликата 7.2 се гледа дека делот од шемата помеѓу краевите $1' - 1'$ и $2' - 2'$ претставува низа (верига) од каскадно поврзани симетрични π -четворополи со параметри $2R_S$, \underline{Z}_r и $2R_S$. Во тој случај за низата од

n такви четворополи, колку што се распони во водот, постојат следните релации [2]

$$\begin{aligned} \underline{U}'_1 &= \underline{U}'_2 \cdot \text{ch}(n\underline{g}) + \underline{Z} \cdot \underline{I}'_2 \cdot \text{sh}(n\underline{g}), \\ \underline{I}'_1 &= \frac{\underline{U}'_2}{\underline{Z}} \cdot \text{sh}(n\underline{g}) + \underline{I}'_2 \cdot \text{ch}(n\underline{g}), \end{aligned} \quad (7.6)$$

или со оглед на релациите: $\underline{U}'_1 = \underline{U}_1$ и $\underline{U}'_2 = \underline{U}_2$, се добива

$$\begin{aligned} \underline{U}_1 &= \underline{U}_2 \cdot \text{ch}(n\underline{g}) + \underline{Z} \cdot \underline{I}'_2 \cdot \text{sh}(n\underline{g}), \\ \underline{I}'_1 &= \frac{\underline{U}_2}{\underline{Z}} \cdot \text{sh}(n\underline{g}) + \underline{I}'_2 \cdot \text{ch}(n\underline{g}), \end{aligned} \quad (7.7)$$

Ако воведеме

$$\underline{Q} = 1 + \frac{\underline{Z}_r}{2R_S}, \quad (7.8)$$

тогаш може да се покаже [2] дека за параметрите \underline{g} и \underline{Z} што фигурираат во равенките (7.7) ќе важи

$$\underline{g} = \ln \left(\underline{Q} + \sqrt{\underline{Q}^2 - 1} \right) = \ln \left[1 + \frac{\underline{Z}_r}{2R_S} + \sqrt{\frac{\underline{Z}_r}{R_S} + \left(\frac{\underline{Z}_r}{2R_S} \right)^2} \right], \quad (7.9)$$

$$\underline{Z} = \sqrt{\frac{2R_S \underline{Z}_r}{2 + \underline{Z}_r / (2R_S)}} = 2R_S \cdot \sqrt{\frac{\underline{Q} - 1}{\underline{Q} + 1}}. \quad (7.10)$$

Бидејќи во реални услови е секогаш задоволена релацијата

$$\left| \frac{\underline{Z}_r}{2R_S} \right| \ll 1, \quad (7.11)$$

тогаш на база на апроксимацијата

$$\ln(1 + \xi) \approx \xi, \quad (\xi \ll 1),$$

која што важи за мали вредности на ξ , врз основа на (7.9) ќе добиеме

$$\underline{g} \approx \frac{\underline{Z}_r}{2R_S} + \sqrt{\frac{\underline{Z}_r}{R_S} + \left(\frac{\underline{Z}_r}{2R_S} \right)^2} \approx \frac{\underline{Z}_r}{2R_S} + \sqrt{\frac{\underline{Z}_r}{R_S}}, \quad (7.12)$$

додека за \underline{Z} , имајќи ја предвид релацијата (7.10), се добива уште поупростен израз:

$$\underline{Z} \approx \sqrt{\underline{Z}_r \cdot R_S}. \quad (7.13)$$

Сега можеме да ја пресметаме и влезната импеданција \underline{Z}_{v1} , меродавна за оценка на влијанието на надземниот вод врз приликите во целиот ЗС на мрежата.

Од шемата прикажана на сликата 7.2 следува

$$\underline{Z}_{v1} = \underline{Z}'_{v1} \Pi(2R_S) = \frac{\underline{Z}'_{v1} \cdot 2R_S}{\underline{Z}'_{v1} + 2R_S}, \quad (7.14)$$

каде што со \underline{Z}'_{v1} е означен односот помеѓу напонот \underline{U}'_1 и струјата \underline{I}'_1 , т.е.

$$\underline{Z}'_{v1} = \frac{\underline{U}'_1}{\underline{I}'_1}. \quad (7.15)$$

Ако во првата равенка од (7.7) струјата \underline{I}'_2 се изрази преку напонот \underline{U}_2

$$\underline{U}_2 = \underline{Z}'_2 \cdot \underline{I}'_2, \quad (7.16)$$

каде што е

$$\underline{Z}'_2 = \underline{Z}_2 \Pi(2R_S) = \frac{\underline{Z}_2 \cdot 2R_S}{\underline{Z}_2 + 2R_S} \quad (7.17)$$

ќе добиеме

$$\underline{Z}'_{v1} = \underline{Z} \cdot \frac{\text{ch}(ng) + \frac{\underline{Z}}{\underline{Z}'_2} \cdot \text{sh}(ng)}{\text{sh}(ng) + \frac{\underline{Z}}{\underline{Z}'_2} \cdot \text{ch}(ng)}. \quad (7.18)$$

На тој начин, со замена на (7.18) во (7.14) може да се пресмета вредноста на влезната импеданција на водот \underline{Z}_{v1} со која неговиот заземјувачки систем може да се еквивалентира без какво и да е занемарување.

Покрај пресметката на влезната импеданција \underline{Z}_{v1} , корисно е да се знае и вредноста на потенцијалот \underline{U}_2 , пренесен на постројката „2“. Пренесениот потенцијал (некои го нарекуваат изнесениот потенцијал) \underline{U}_2 можеме да го процениме преку *факторот на изнесување* \underline{k}_i

$$\underline{U}_2 = \underline{k}_i \cdot \underline{U}_1. \quad (7.19)$$

Неговата вредност ќе ја добиеме ако во првата равенка од системот (7.7) вредноста на напонот \underline{U}_2 се замени преку \underline{I}'_2 и \underline{Z}'_2 . На тој начин се добива

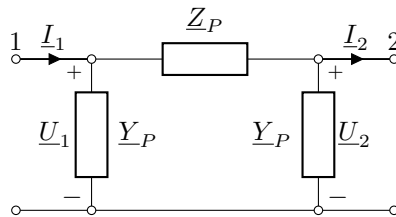
$$\underline{k}_i = \frac{\underline{U}_2}{\underline{U}_1} = \frac{1}{\text{ch}(ng) + \frac{\underline{Z}}{\underline{Z}'_2} \cdot \text{sh}(ng)}. \quad (7.20)$$

Од досегашните анализи произлегува дека целиот заземјувачки систем од водот може да се еквивалентира со π -заменска шема, т.е. со

еден единствен π -четворопол, како што е тоа прикажано на сликата 7.3. Параметрите \underline{Z}_P и \underline{Y}_P на еквивалентата π -заменска шема на ЗС на водот се пресметуваат со помош на релациите (7.21) и (7.22).

$$\underline{Z}_P = \underline{Z} \cdot \text{sh}(ng), \quad (7.21)$$

$$\underline{Y}_P = \frac{\text{ch}(ng) - 1}{\underline{Z} \cdot \text{sh}(ng)} + \frac{1}{2R_S}. \quad (7.22)$$



Слика 7.3. π -заменска шема на заземјувачкиот систем на водот од сликата 7.2

7.2.2 Приближни изрази за влезната импеданција

Изведените релации (7.18) и (7.20) за величините \underline{Z}_{vl} и k_i , иако навидум едноставни, тешко се пресметуваат без примена на компјутер. Затоа овде ќе бидат наведени некои упростени изрази за истите тие величини. Тие упростени изрази ќе бидат доволно точни во случаите кога посматраниот надземен вод е долг (или доволно долг), или пак, водот е кус (т.е. доволно кус).

Долги водови

Формулацијата дали водот е долг или кус не зависи само од неговата физичка должина l , т.е. од бројот на распони n и од средната должина на распонот a , туку зависи и од величините \underline{Z}_r и R_S . Се покажува [2] дека за „долгите водови“, кај кои е исполнет условот

$$n \geq \frac{3}{\text{Re}(g)}, \quad n \geq \frac{3}{\alpha},$$

за пресметка на влезната импеданција на водот може да се користи упростената релација (7.23) и притоа грешката, т.е. разликата помеѓу приближната и точната вредност, нема да биде поголема од 5%

$$\underline{Z}_{vl} \approx \sqrt{\underline{Z}_r \cdot R_S} - \frac{\underline{Z}_r}{2}. \quad (7.23)$$

Кај многу долгите надземни водови надолжната импеданција Z_P во π -заменската шема од сликата 7.3 станува многу голема, т.е. нејзината вредност тежи кон ∞ . Затоа таа може да се изостави од моделот. Од тука произлегува заклучокот дека кај долгите водови приликите во постројките на почетокот и на крајот од водот не си влијаат едни врз други.

Куси водови

За „кусите водови“, чиј број на распони е

$$n \leq \frac{0,316}{|g|},$$

со грешка до 5% важи

$$\underline{Z}_{vl} = \frac{Z'_2 + n \cdot \underline{Z}_r}{1 + n \cdot \frac{Z'_2}{R_S}}, \quad \underline{Z}'_2 = \frac{2R_S \cdot \underline{Z}_2}{2R_S + \underline{Z}_2}. \quad (7.24)$$

7.3 Егзактно моделирање на заземјувачкиот систем на надземен вод

Кога се работи за земјоспој на самиот НВ и кога е потребно да се пресметуваат приликите во секое негово столбно место (секоја точка од било кој распон), се применува егзактниот модел на водот. Во тој случај мора да се води сметка за вистинските должини на сите распони, вистинските вредности на отпорностите на распростирање на секое столбно место, но ќе треба уште да се уважи магнетната (индуктивната) спрега помеѓу заштитното јаже и фазните спроводници. Индуктивната спрега се уважува преку меѓусебната импеданија Z_m на фазниот спроводник во кој тече струјата на доземниот спој и заштитното јаже. Таа се пресметува со помош на релацијата (7.25), [2]

$$\underline{Z}_m = r_z + 0,1445 \cdot \log \frac{D_{ek}}{D_{zm}}, \quad (7.25)$$

каде што се

$$r_z = \frac{\mu \cdot \pi \cdot f}{4} \approx 0,05 \frac{\Omega}{\text{km}}, \quad (7.26)$$

$$D_{zm} = \sqrt[3]{D_{zA} \cdot D_{zB} \cdot D_{zC}}. \quad (7.27)$$

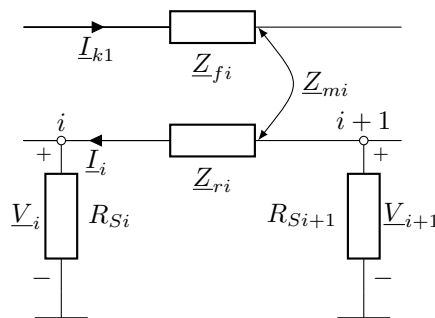
Величината r_z што фигурира во (7.25), е според моделот на Карсон (Carson) и Руденберг (Rüdenberg), т.н. активна отпорност по единица должина на „повратниот пат“ на струјата во земјата. Величината D_{zm} ,

пак, е средна-геометриска вредност од растојанијата помеѓу заштитното јаже на надземниот вод и трите фазни спроводници D_{zA} , D_{zB} и D_{zC} . Ако надземниот вод има две заштитни јажиња, тогаш D_{zm} ќе биде средна-геометриска вредност од растојанијата помеѓу точката z' што се наоѓа на средината помеѓу двете заштитни јажиња и трите фазни спроводници. Величината D_{ek} што фигурира во (7.27) го има истото значење како и порано. Таа е дефинирана со релацијата (7.5).

Посматраме надземен вод што поврзува две постројки p и q . Нека водот работи во режим на земјоспој (спој на една од фазите со земја, т.е. со телото на столбот) при што земјоспојот настанал на столбното место k ($1 < k < n$). По повредената фаза од надземниот вод кон местото на земјоспојот (кусата врска) течат струите I_{k1} и I_{k2} ($I_{k1} + I_{k2} = I_k$).

Нека го набљудуваме i -тиот распон кој што се наоѓа помеѓу столбовите i и $i + 1$ (слика 7.4) и нека претпоставиме дека е $i < k$.

Поради постоењето на индуктивна спрега помеѓу фазниот спроводник на кој што настанал земјоспојот и заштитното јаже, во јажето ќе се индуцира ЕМС која ќе дејствува во насока спротивна од насоката на течење на струјата на грешка I_{k1} во фазниот спроводник, т.е. во насока на струјата I_i (слика 7.4).



Слика 7.4. Приказ на еден распон од НВ кој се наоѓа лево од местото на грешката

Поедините величини што фигурираат на сликата 7.4 ги имаат следните значења

- Z_{fi} надолжна импеданција на фазниот спроводник на гранката i ;
- Z_{ri} надолжна импеданција на заштитното јаже на гранката i ;
- Z_{mi} меѓусебна импеданција меѓу фазниот спроводник и заштитното јаже во распонот i ;
- R_{Si} отпорност на распростирање на заземјувачот на столбот со реден број i од НВ;
- I_{k1} струја во фазниот спроводник при КВ која тече од постројката „1“ кон јазолот k ;

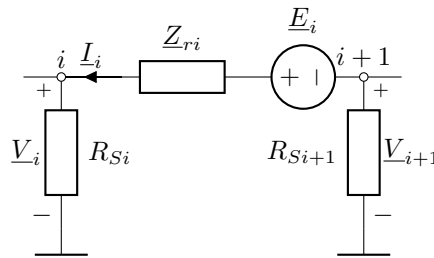
\underline{I}_i струја во ЗЈ во гранката i ;
 \underline{V}_i потенцијал на столбот i ;
 \underline{V}_{i+1} потенцијал на столбот $i + 1$.

Според II Кирхофов закон, за контурата заштитно јаже-земја на распонот i , кој што се наоѓа помеѓу постројката p и столбот k на кој дошло до грешката ($i < k$), важи

$$\underline{V}_{i+1} - \underline{V}_i - \underline{Z}_{ri} \cdot \underline{I}_i + \underline{Z}_{mi} \cdot \underline{I}_{k1} = 0. \quad (7.28)$$

Равенката (7.28) дозволува посматраниот распон a_i да се претстави поедноставно на тој начин што фазниот спроводник од погодената фаза и заштитното јаже ќе се распрегнат, а постоењето на заемната спрега ќе се уважи со воведување на еквивалентен напонски генератор со напон \underline{E}_i (слика 7.5) чија вредност се пресметува според равенката

$$\underline{E}_i = \underline{Z}_{mi} \cdot \underline{I}_{k1}. \quad (7.29)$$



Слика 7.5. Заменска шема на еден распон со еквивалентен напонски генератор

Од (7.28) и (7.29) следува

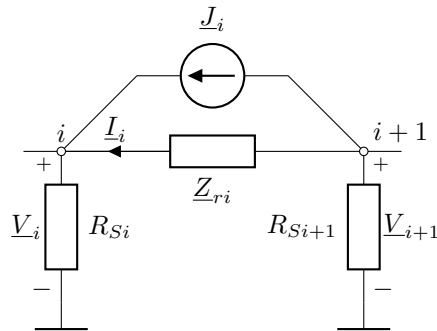
$$\underline{V}_{i+1} - \underline{V}_i = \underline{Z}_{ri} \cdot \underline{I}_i - \underline{E}_i = 0 \quad (7.30)$$

Ако во шемата од слика 7.5 се изврши трансфигурација на напонскиот генератор во струен (слика 7.6), ќе се добие нов модел во кој напонскиот генератор е еквивалентиран со струен генератор со струја \underline{J}_i .

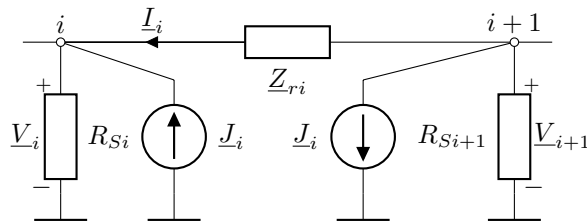
$$\underline{J}_i = \frac{\underline{E}_i}{\underline{Z}_{ri}} = \frac{\underline{Z}_{mi}}{\underline{Z}_{ri}} \cdot \underline{I}_{k1} \quad (7.31)$$

Овој струен генератор понатаму може да се еквивалентира со помош на два струјни генератора како на сликата 7.7.

На овој начин меѓусебната индуктивност помеѓу фазниот спроводник и заштитното јаже во секој распон i ($i \leq k - 1$) се зема предвид преку



Слика 7.6. Заменска шема на еден распон со еквивалентен струен генератор



Слика 7.7. Заменска шема со еквивалентни струјни генератори

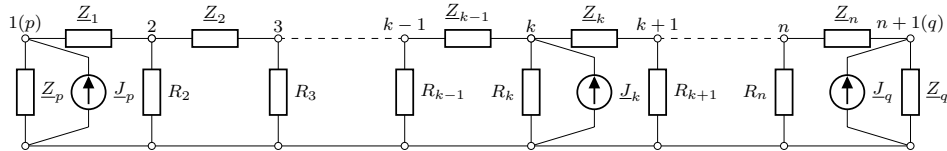
поставување на два еквивалентни струјни генератора на краевите на распонот, според слика 7.7, со струја пресметана според изразот (7.31). Притоа, во јазелот со поголем индекс се вклучува струен генератор чија што насока е негативна (струјата излегува од јазелот), додека во јазелот со помал индекс струјниот генератор има позитивна насока (струјата влегува во јазелот).

Истата постапка се применува и за делот од водот десно од столбот k каде што настанал земјоспојот, со таа разлика што струјата I_{k2} во фазниот спроводник ќе тече од десно на лево, кон местото на грешката (столбот k). За распонот i ($i \geq k$) во овој случај може да се нацрта шема слична на шемата од сликата 7.4 со таа разлика што насоките на струите сега ќе бидат обратни.

Доколку секој од распоните a_i ($i = 1, 2, \dots, n$) од НВ се прикаже со помош на еквивалентот од сликата 7.7, тогаш целиот ЗС, кој претставува каскада од n четворополи, може да се прикаже со шемата од слика 7.8. Во неа со p и q се означени почетниот и крајниот јазел (собирица) од посматраниот вод.

На сликата 7.8 сите напонски генератори E_i , со кои се опфаќаат индуцираните ЕМС во заштитното јаже на секој распон, се

еквивалентирани со по 2 струјни генератори поставени лево и десно кај двата столба кои го содржат разгледуваниот распон a_i .



Слика 7.8. Еквивалентна шема на ЗС од посматраниот надземен вод

Да забележиме дека според (7.31), струите на овие струјни генератори не зависат од должината на распонот, туку од односот $\underline{Z}_{mi}/\underline{Z}_{ri}$ којшто е константен. На овој начин во секое столбно место се јавуваат по два, исти по јачина, струјни генератори кои се опозиционо поставени така што се поништуваат. Така се добива дека еквивалентната шема на целиот вод ќе содржи само 3 струјни генератори со \underline{J}_p , \underline{J}_k и \underline{J}_q , поставени во јазелот на грешката k и на краевите од надземниот вод p и q . Големините на овие струи се пресметуваат со помош на релациите (7.32).

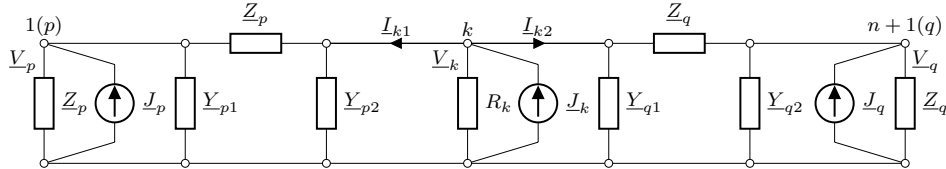
$$\begin{aligned} \underline{I}_{kv} &= \underline{I}_{k1} + \underline{I}_{k2} \\ \underline{J}_p &= \frac{\underline{Z}_m}{\underline{Z}_r} \cdot \underline{I}_{k1} \\ \underline{J}_q &= \frac{\underline{Z}_m}{\underline{Z}_r} \cdot \underline{I}_{k2} \\ \underline{J}_k &= \underline{I}_{kv} - \underline{J}_p - \underline{J}_q = \left(1 - \frac{\underline{Z}_m}{\underline{Z}_r}\right) \cdot \underline{I}_{kv}. \end{aligned} \quad (7.32)$$

Во колото од сликата 7.8 со $\underline{Z}_p = R_1 \parallel \underline{Z}_{ek.1}$ и $\underline{Z}_q = \underline{Z}_{ek.2}$ се означени еквивалентните импеданции во крајните постројки p и q , додека со R_i ($i = 1, 2, \dots, n$) и \underline{Z}_i ($i = 1, 2, \dots, n$) се означени отпорностите на распространење на заземјувачите од столбовите и импеданците на заштитното јаже во одделните распони од водот.

Познато е дека за пресметување на распределбата на фазните струи \underline{I}_{kv} , \underline{I}_{k1} и \underline{I}_{k2} при доземен спој во произволно место k долж водот е доволно да бидат познати стандардните податоци кои се излезен резултат од вообичаените пресметки на струите на куси во ЕЕС, а тоа се фазните струи на трифазна и еднофазна КВ за трите карактеристични периоди - суптранзиентен, транзиентен и траен. Со нивна помош се пресметуваат горенаведените струи.

Понатаму решавањето на електричното коло од сликата 7.8 може да се изврши на разни начини. Овде ќе биде прикажан еден сосема едноставен начин за решавање на состојбата во ЗС на водот. Тој

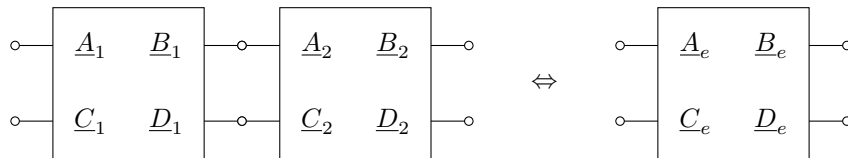
овозможува директно пресметување на потенцијалот V_k на столбот k кај кој настанал земјоспојот, но и пресметување на струите I_{k1} и I_{k2} што течат во ЗЈ лево и десно од местото на грешката.



Слика 7.9. Упростена шема на колото од сликата 7.8

На сликата 7.9 е прикажана упростена шема на ЗС од сликата 7.8.

Во неа делот од ЗС на водот лево од местото на грешката k е прикажан со еден еквивалентен π -четворпол со параметри \underline{Y}_{p1} , \underline{Y}_{p2} и \underline{Z}_p . На сличен начин, преостанатиот дел од ЗС, десно од местото на грешката, е прикажан со друг еквивалентен π -четворпол, со параметри \underline{Y}_{q1} , \underline{Y}_{q2} и \underline{Z}_q . Параметрите на двата еквивалентни π -четворпола можат да се добијат, на пример, по пат на последователни трансфигурации со кои се елиминираат непотребните јазли. Но поедноставно е ако за таа цел се примени повеќекратно техниката на sukcesивно еквивалентирање на два каскадно врзани четворпола со еден еквивалентен, според процедурата шематски прикажана на сликата 7.10 и равенката (7.33).



Слика 7.10. Еквивалентирање на два каскадно врзани четворпола со еден еквивалентен

Параметрите на еквивалентниот четворпол се пресметуваат со равенките

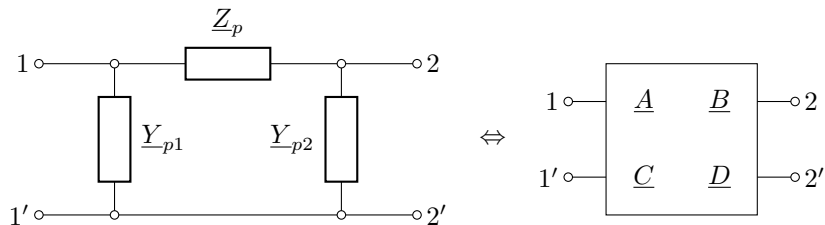
$$\begin{aligned} \underline{A}_e &= \underline{A}_1 \cdot \underline{A}_2 + \underline{B}_1 \cdot \underline{C}_2, \\ \underline{B}_e &= \underline{A}_1 \cdot \underline{B}_2 + \underline{B}_1 \cdot \underline{D}_2, \\ \underline{C}_e &= \underline{C}_1 \cdot \underline{A}_2 + \underline{D}_1 \cdot \underline{C}_2, \\ \underline{D}_e &= \underline{C}_1 \cdot \underline{B}_2 + \underline{D}_1 \cdot \underline{D}_2, \end{aligned} \quad (7.33)$$

т.е. важи

$$\begin{bmatrix} \underline{A}_e & \underline{B}_e \\ \underline{C}_e & \underline{D}_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{A}_1 & \underline{B}_1 \\ \underline{C}_1 & \underline{D}_1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \underline{A}_2 & \underline{B}_2 \\ \underline{C}_2 & \underline{D}_2 \end{bmatrix}. \quad (7.34)$$

Притоа меѓу параметрите \underline{A} , \underline{B} , \underline{C} и \underline{D} на еден π -четворопол и неговите параметри \underline{Y}_{p1} , \underline{Y}_{p2} и \underline{Z}_p (слика 7.11), постојат еднозначни релации дадени со следните изрази

$$\begin{aligned}
 \underline{A} &= 1 + \underline{Z}_p \cdot \underline{Y}_{p2}, \\
 \underline{B} &= \underline{Z}_p, \\
 \underline{C} &= \underline{Y}_{p1} + \underline{Y}_{p2} + \underline{Z}_p \cdot \underline{Y}_{p1} \cdot \underline{Y}_{p2}, \\
 \underline{D} &= 1 + \underline{Z}_p \cdot \underline{Y}_{p1}, \\
 \underline{Z}_p &= \underline{B}, \\
 \underline{Y}_{p1} &= (\underline{D} - 1) / \underline{B}, \\
 \underline{Y}_{p2} &= (\underline{A} - 1) / \underline{B}.
 \end{aligned}
 \tag{7.35}$$



Слика 7.11. Општ случај на π -четворопол

Колото од сликата 7.9 има само 3 јазли: p , k и q . Тоа лесно се решава, на пример со помош на методот на независни напони на јазлите. Со неговото решавање се добиваат бараниот потенцијал \underline{V}_k и бараните струи \underline{I}_k и \underline{I}_{k+1} , а по потреба и потенцијалите \underline{V}_p и \underline{V}_q .

Доколку е потребно да се пресметаат и преостанатите напони и струи во ЗС од надземниот вод, тогаш се враќаме на колото од сликата 7.8. Тргувајќи од јазелот k со познат потенцијал \underline{V}_k и познати струи \underline{I}_{k1} и \underline{I}_k во неговата околина, и одејќи влево кон почетниот јазол p , односно вдесно кон крајниот јазол q , со помош на релации соодветни на оние од типот (7.30) и (7.31), сукцесивно ги пресметуваме напоните и струите во преостанатите распони од ЗС на водот. Се разбира дека решавањето на секој разгледуван распон притоа треба да се врши со помош на колото од сликата 7.5. Од релацијата (7.32) е очигледно дека во местото на грешка се инјектира вкупната струја на грешка, коригирана за т.н. редукиционен фактор, на водот r_f

$$\underline{J}_k = \underline{I}_{kv} - \frac{\underline{Z}_m}{\underline{Z}_r} \cdot \underline{I}_{k1} - \frac{\underline{Z}_m}{\underline{Z}_r} \cdot \underline{I}_{k2} = (1 - r_f) \cdot \underline{I}_{kv}, \tag{7.36}$$

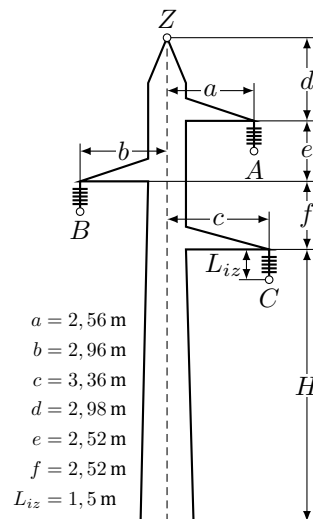
$$r_f = 1 - \frac{\underline{Z}_m}{\underline{Z}_r}. \tag{7.37}$$

7.4 Примери и задачи

Пример 7.1. Да се пресмета редуциониот фактор r_f за водот 110 kV „Скопје 3 – Козјак – Самоков“ за кого се познати следните податоци

- спроводници Al/Č 240/40 mm²;
- заштитно јаже Fe III 50 mm². ($A_{zj} = 50 \text{ mm}^2$; $d_{zj} = 9 \text{ mm}$; $r_{zj} = 3 \Omega/\text{km}$; $\mu_r = 30$);
- просечна вредност на распонот $a = 300 \text{ m}$.

Водот минува низ нерамен карпест терен со просечна специфична отпорност на тлото $\rho = 500 \Omega\text{m}$. Изведен е, главно, со носечки столбови тип М4, производ на „Енергоинвест“ – Сараево, чии што изглед и димензии се прикажани на сликата П.7.1.1.



Слика П.7.1.1

Решение

Подолжните параметри $z = r + jx$ на заштитното јаже како и сопствената импеданција на јагето во еден распон Z_r се добиваат со помош на изразите (7.2) ÷ (7.5)

$$Z_r = z \cdot a = (r + jx) \cdot a$$

$$r = r_z + \frac{1000}{\kappa_{zj} \cdot A_{zj}} = \frac{1000 \cdot \rho_{zj}}{A_{zj}} = 0,05 + \frac{1000 \cdot 0,15}{50} = 3,05 \frac{\Omega}{\text{km}};$$

$$D_{ek} = 658 \cdot \sqrt{\frac{\rho}{f}} = 658 \cdot \sqrt{\frac{500}{50}} = 2081 \text{ m};$$

$$x = 0,1445 \cdot \log \frac{2D_{ek}}{d_{zj}} + 0,0157 \cdot \mu_r = 0,1445 \cdot \log \frac{2 \cdot 2081}{9} + 0,0157 \cdot 30 = 1,29 \frac{\Omega}{\text{km}};$$

$$\underline{z} = r + jx = (3,05 + j1,29) \frac{\Omega}{\text{km}};$$

$$\underline{Z}_r = \underline{z} \cdot a = (0,915 + j0,387) = 0,993 \cdot e^{j22,9^\circ} \Omega.$$

Заемната индуктивност по единица должина \underline{z}_m како и заемната импеданција \underline{Z}_m помеѓу фазниот спроводник и заштитното јаже на водот се пресметуваат со помош на изразите (7.25) ÷ (7.27)

$$\underline{z}_m = r_z + 0,1445 \log \frac{D_{ek}}{D_{zm}} = (0,05 + j0,354) = 0,358 \cdot e^{j82^\circ} \frac{\Omega}{\text{km}};$$

$$\underline{Z}_m = \underline{z}_m \cdot a = (0,015 + j0,106) = 0,107 \cdot e^{j82^\circ} \Omega,$$

каде што растојанието D_{zm} претставува геометриска величина која што зависи од димензиите на главата на столбот и изнесува

$$D_{zm} = \sqrt[3]{D_{zA} \cdot D_{zB} \cdot D_{zC}} = \sqrt[3]{5,16 \cdot 7,6 \cdot 10,1} = 7,343 \text{ m.}$$

Во согласност со релацијата (7.37) редуциониот фактор на водот r_f ќе биде

$$\frac{\underline{Z}_m}{\underline{Z}_r} = \frac{\underline{z}_m}{\underline{z}_r} = (0,0056 + j0,0927) = 0,108 \cdot e^{j59,0^\circ};$$

$$r_f = 1 - \frac{\underline{Z}_m}{\underline{Z}_r} = (0,944 - j0,093) = 0,949 \cdot e^{-j5,6^\circ}.$$

Интересно е да се забележи дека редуциониот фактор на еден вод зависи од поголем број параметри: карактеристиките на заштитното јаже, т.е. неговата подолжна импеданција \underline{z} , геометријата на главата на столбот, т.е. меѓусебното растојание D_{zm} и специфичната отпност на тлото. Но од сите нив највлијателен е првиот параметар \underline{z} , додека величината D_{zm} или пак специфичната опторност ρ малку влијаат врз вредноста на факторот r_f .

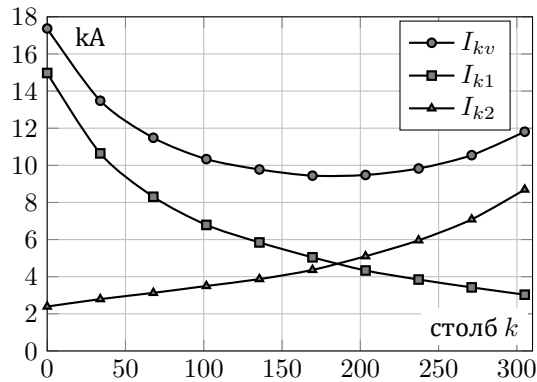
Така, на пример, за овде анализираниот случај се покажува дека со промената на растојанието D_{zm} за $\pm 10\%$, редуциониот фактор се менува за помалку од $\pm 0,1\%$, а односите се слични и за поголеми промени на параметарот D_{zm} . Слично, промената на параметарот ρ малку влијае врз вредноста на редуциониот фактор r_f за што зборува следната табела.

Табела П.7.1.1. Зависност на редуциониот фактор на водот од специфичната отпорност на тлото

$\rho(\Omega\text{m})$	$D_{ek}(\text{m})$	$ r_f $	$\arg\{r_f\}$
50	658,0	0,957	-4,4°
100	930,6	0,955	-4,8°
200	1316,0	0,952	-5,1°
300	1611,8	0,951	-5,3°
400	1861,1	0,950	-5,5°
500	2080,8	0,949	-5,6°
1000	2942,7	0,947	-6,0°

□ □ □

Пример 7.2. Со помош на прикажаниот егзактен модел е пресметувана состојбата во ЗС од 400 kV вод Битола 2 – Скопје 4 при појава на земјоспој во разни точки долж водот. Неопходите подлоги за параметрите се преземени од соодветниот Главен проект. Податоците за струите на еднофазни и трифазни куси врски во крајните јазли се преземени од Студија за развој на ЕЕС на РМ и се однесуваат на максималниот режим за 2002 година.

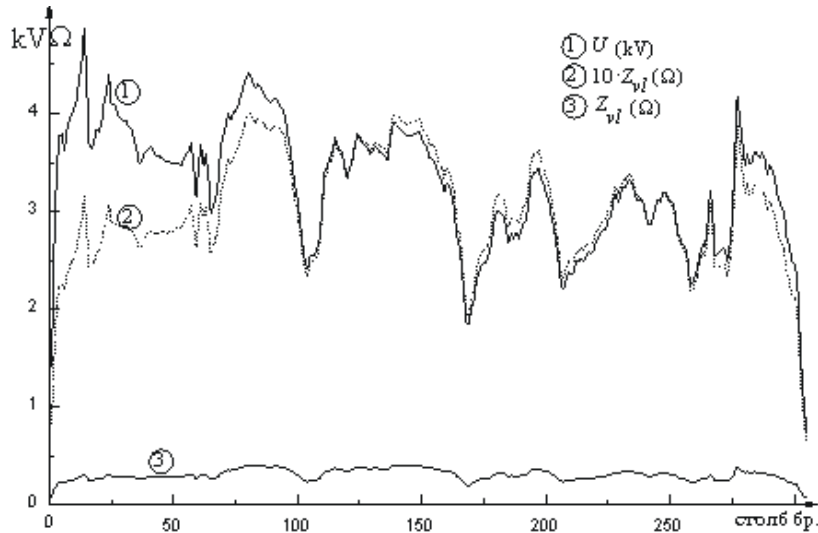


Слика П.7.2.1. Зависност на големината на фазните струи на еднофазна куса врска од локацијата k

Решение

На сликата П.7.2.1 е прикажана зависноста на фазните струи на еднофазна куса врска од локацијата на грешката. На сликата П.7.2.2, пак,

е прикажана зависноста на потенцијалот U_k на столбот со реден број k ($1 \leq k \leq n + 1$) на кој што настанал земјоспојот, за разни локации на местото на грешката (крива 1). На истата слика е прикажан модулот на „влезната“, т.е. еквивалентната, импеданција на водот на местото на грешка (крива 2 и 3).



Слика П.7.2.2. Зависност на модулот на влезната импеданција Z_{vl} и потенцијалот U на столбот кај кој што настанал земјоспојот од локацијата k на местото на грешката



Пример 7.3. Со примена на постапка како во примерот 7.1, за 110 kV надземен вод изведен на столбовите тип М4, производ на „Енергеоинвест“ – Сараево, да се изврши пресметка на вредностите на редукциониот фактор r_f во зависност од специфичната отпорност на тлото $\rho = 100 \Omega m$ за следните 9 случаи на типот на заштитно јаже

јаже	$A_{zj}(\text{mm}^2)$	$d_{zj}(\text{mm})$	$r_{zj}(\Omega/\text{km})$
а) Fe III 35 mm ²	34,4	7,5	4,36
б) Fe III 50 mm ²	49,5	9	3,032
в) Fe III 70 mm ²	65,2	10,5	2,301
г) Al/Č 35/6 mm ²	34,3	8,1	0,835
д) Al/Č 50/8 mm ²	51,2	11,7	0,564
ѓ) Al/Č 50/30 mm ²	51,2	11,7	0,564
е) Al/Č 95/55 mm ²	96,5	16,0	0,389
ж) Al/Č 120/70 mm ²	122,0	18,0	0,299
з) AWG 126,1 mm ²	126,1	13,0	0,600

Решение

Во примерот 7.1 беше покажано дека меѓусебното растојание D_{zm} помеѓу заштитното јаже и фазните спроводници за столбот тип М4 изнесува $D_{zm} = 7,343$ m, додека меѓусебната импеданција \underline{z}_m помеѓу заштитното јаже и фазните спроводници изнесува

$$\underline{z}_m = r_z + 0,1445 \log \frac{D_{ek}}{D_{zm}} = (0,05 + j0,354) = 0,358 \cdot e^{j82^\circ} \frac{\Omega}{\text{km}},$$

Оваа импеданција ќе биде практично иста и за останатите 110 kV столбови бидејќи таа многу малку зависи од растојанието D_{zm} или пак од специфичната отпорност ρ .

Растојанието D_{ek} помеѓу заштитното јаже и повратниот пат на струјата низ земјата за $\rho = 100 \Omega\text{m}$ изнесува $D_{ek} = 930,6$ m. Сега со помош на познатите изрази (7.2) ÷ (7.5), на начин како што тоа беше направено во примерот 7.1, можеме да ги пресметаме најнапред надолжната импеданција на јажето \underline{z} , а потоа со релацијата (7.37) и редукциониот фактор r_f . Резултатите од пресметките се сместени во следната табела.

Табела П.7.3.1. Редукционен фактор на 110 kV вод со разни типови заштитно јаже

јаже	μ_r	$\underline{z} (\Omega/\text{km})$	$ \underline{z} $	$\arg \{\underline{z}\}$	$ r_f $	$\arg \{r_f\}$
а) Fe III 35 mm ²	30	4,410 + j1,251	4,584	15,8	0,973	-3,6
б) Fe III 50 mm ²	30	3,082 + j1,289	3,322	21,9	0,955	-4,8
в) Fe III 70 mm ²	30	2,351 + j1,229	2,653	27,6	0,935	-5,7
г) Al/Џ 35/6 mm ²	1	0,885 + j0,790	1,187	41,8	0,814	-11,5
д) Al/Џ 50/8 mm ²	1	0,645 + j0,780	1,012	50,4	0,753	-11,7
ѓ) Al/Џ 50/30 mm ²	1	0,614 + j0,767	0,983	51,3	0,743	-11,9
е) Al/Џ 95/55 mm ²	1	0,439 + j0,748	0,867	59,6	0,681	-10,8
ж) Al/Џ 120/70 mm ²	1	0,349 + j0,740	0,818	64,8	0,646	-9,2
з) AWG 126,1 mm ²	1	0,650 + j0,761	1,001	49,5	0,754	-12,2

□ □ □

Пример 7.4. Еден 110 kV надземен вод е изведен со заштитно јаже тип Al/Џ 50/30. Просечната вредност на отпорностите на рапростирање на заземјувачите на столбовите изнесува $R_S = 10 \Omega$. Специфичната отпорност на тлото по должината на трасата од водот изнесува $\rho = 100 \Omega\text{m}$. Водот е долг $l = 10$ km и има вкупно $n = 40$ распони. Еквивалентната импеданција на постројката на крајот од водот

изнесува $\underline{Z}_2 = (0,5 + j0) \Omega$. Да се пресмета влезната (еквивалентната) импеданција на водот \underline{Z}_{vl} и факторот на изнесениот потенцијал k_i . Во задачата водот да се посматра идеализирано, т.е. да се претпостави дека сите столбови имаат иста вредност на отпорноста R_S и сите распони се со иста должина $a = l/n = 250$ m.

Решение

Најнапред, со помош на релациите (7.3) и (7.4) ќе ги пресметаме надолжните параметри на заштитното јаже r и x , а потоа, со помош на (7.2) и импеданцијата на јагето во еден распон \underline{Z}_r . За јагето Al/Č 50/30 се познати следните параметри: $A_{zj} = 51,2 \text{ mm}^2$; $r = 0,564 \Omega/\text{km}$; $d_{zj} = 11,7 \text{ mm}$; $\mu_r = 1$. Според тоа ќе имаме

$$D_{ek} = 658 \cdot \sqrt{\frac{\rho}{f}} = 658 \cdot \sqrt{\frac{100}{50}} = 930,6 \text{ m};$$

$$x = 0,1445 \cdot \log \frac{2D_{ek}}{d_{zj}} + 0,0157 \cdot \mu_r =$$

$$= 0,1445 \cdot \log \frac{2 \cdot 930,6}{11,7 \cdot 10^{-3}} + 0,0157 \cdot 1 = 0,767 \Omega/\text{km};$$

$$\underline{Z}_r = (r + jx) \cdot a = (0,564 + j0,767) \cdot 0,25 = (0,141 + j0,192) \Omega/\text{km}.$$

Понатаму, врз основа на (7.8) ја пресметуваме помошната комплексна величина \underline{Q}

$$\underline{Q} = 1 + \frac{\underline{Z}_r}{2R_S} = 1 + \frac{0,141 + j0,192}{20} = 1,0071 \cdot e^{j0,546^\circ};$$

а потоа и величините \underline{g} и \underline{Z} со помош на изразите (7.9) и (7.10)

$$\underline{g} = \ln \left(\underline{Q} + \sqrt{\underline{Q}^2 - 1} \right) = (0,137635 + j0,0695) = 0,154185 \cdot e^{j26,79^\circ};$$

$$\underline{Z} = \sqrt{\frac{\underline{Z}_r \cdot 2R_S}{2 + \underline{Z}_r/(2R_S)}} = (1,376 + j0,692) = 1,54 \cdot e^{j26,7^\circ} \Omega.$$

Водот може да се третира како „долг“ бидејќи границата n_d за долгите водови изнесува

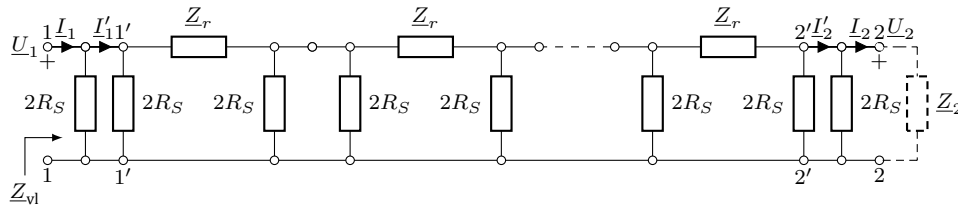
$$n_d = \frac{3}{\text{Re}\{\underline{g}\}} = \frac{3}{0,137635} = 22,$$

од каде што следува $n > n_d$.

Понатаму имаме

$$\begin{aligned} e^{ng} &= -230,095 + j87,078; \\ \operatorname{ch}(ng) &= (e^{ng} + e^{-ng})/2 = -115,0494 + j43,5383; \\ \operatorname{sh}(ng) &= (e^{ng} - e^{-ng})/2 = -115,0456 + j43,5397. \end{aligned}$$

На сликата П.7.4.1 е прикажана еквивалентната шема на водот, третиран како елемент на ЗС.



Слика П.7.4.1. Шема на заземјувачкиот систем на водот

Понатаму, врз основа на (7.17) и сликата П.7.4.1 можеме да пишуваме

$$\underline{Z}'_2 = \underline{Z}_2 \Pi(2R_S) = \frac{\underline{Z}_2 \cdot 2R_S}{\underline{Z}_2 + 2R_S} = \frac{0,5 \cdot 20}{0,5 + 20} = 0,489 \Omega;$$

Понатаму, врз основа на (7.18) ќе ја добиеме вредноста на влезната импеданција \underline{Z}'_{vl} помеѓу точките 1 – 1'

$$\underline{Z}'_{vl} = \underline{Z} \cdot \frac{\operatorname{ch}(ng) + \frac{\underline{Z}}{\underline{Z}'_2} \cdot \operatorname{sh}(ng)}{\operatorname{sh}(ng) + \frac{\underline{Z}}{\underline{Z}'_2} \cdot \operatorname{ch}(ng)} = (1,37584 + j0,69192) \Omega;$$

$$\underline{Z}_{vl} = \underline{Z}'_{vl} \Pi(2R_S) = \frac{\underline{Z}'_{vl} \cdot 2R_S}{\underline{Z}'_{vl} + 2R_S} = (1,3069 + j0,60508) = 1,4402 \cdot e^{j24,84^\circ} \Omega.$$

И конечно, врз основа на изразот (7.20) ќе го добиеме коефициентот на изнесување на потенцијалот k_i

$$\underline{k}_i = \frac{U_2}{U_1} = \frac{1}{\operatorname{ch}(ng) + \frac{\underline{Z}}{\underline{Z}'_2} \cdot \operatorname{sh}(ng)} = (-1,995 + j0,013) \cdot 10^{-3};$$

$$|\underline{k}_i| = 0,002.$$

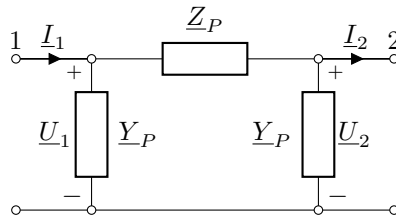
Значи на другиот крај од водот ќе се изнесе потенцијал во висина од само 0,2% од напонот \underline{U}_1

$$\underline{U}_2 = \underline{k}_i \cdot \underline{U}_1; \quad U_2 = 0,002 \cdot U_1.$$

Да ги пресметаме параметрите на π -заменската шема на водот, посматран како елемент на заземјувачкиот систем. Параметрите \underline{Z}_P и \underline{Y}_P на оваа шема (слика П.7.4.2), во согласност со релациите (7.21) и (7.22) ќе бидат

$$\underline{Z}_P = \underline{Z} \cdot \text{sh}(n\underline{g}) = 190,025 \cdot e^{j186^\circ} \Omega;$$

$$\underline{Y}_P = \frac{\text{ch}(n\underline{g}) - 1}{\underline{Z} \cdot \text{sh}(n\underline{g})} + \frac{1}{2R_S} = 0,6994 \cdot e^{-24,7^\circ} \text{ S}.$$



Слика П.7.4.2. π заменска шема на заземјувачкиот систем на посматраниот вод



Пример 7.5. Параметрите \underline{Z}_{vl} и граничниот број на распони n_d за 110 kV надземен вод од примерот 7.4 да се пресметаат приближно, со помош на изразите што важат за „долгите водови“. Колкава е разликата во добиените резултати?

Решение

Кога е водот доволно долг $n > n_d$, како во разгледуваниот случај, тогаш може да се примени упростениот израз (7.23) кој што ја дава приближната вредност на влезната импеданција на водот \underline{Z}_{vl} , но на многу поедноставен начин

$$\underline{Z}_{vl} \approx \sqrt{\underline{Z}_r \cdot R_s} - \frac{\underline{Z}_r}{2} =$$

$$= \sqrt{(0,141 + j0,192) \cdot 10} - \frac{(0,141 + j0,192)}{2} = 1,438 \cdot e^{j24,7^\circ} \Omega.$$

Очигледно е дека грешката при пресметувањето на влезната импеданција \underline{Z}_{vl} со помош на приближниот израз (7.23) е изнесува само 0,15% и таа е занемарливо мала од каде што може да се извлече заклучокот дека приближниот израз (7.23), како многу поедноставен, може слободно да се применува кај „долгите водови“.



Пример 7.6. Да се пресмета влезната импеданција \underline{Z}_{vl} и граничниот број на распони n_d за кои водот може да се третира како „долг“ за случајот кога надземниот вод од примерот 7.4 е изведен со челично заштитно јаже од типот Fe III 50 mm², за коешто е познато $\mu_r = 30$; $r = 3 \Omega/\text{km}$; $d = 9 \text{ mm}$. Просечната вредност на отпорностите на распостирање на столбовите е $R_S = 10 \Omega$, а просечниот распон $a = 250 \text{ m}$.

Решение

Подолжната импеданцијата на заштитното јаже $\underline{z} = r + jx$ како и импеданцијата на распонот $\underline{Z}_r = \underline{z} \cdot a$ во овој случај ќе бидат

$$\underline{z} = (r + jx) = (3 + j1,239) \Omega/\text{km}; \quad \underline{Z}_r = \underline{z} \cdot a = (0,75 + j0,31) \Omega.$$

Со постапка на полно иста како и во примерот 7.4 за величината \underline{Q} ја добиваме вредноста

$$\underline{Q} = 1 + \frac{\underline{Z}_r}{2R_S} = 1 + \frac{0,75 + j0,31}{20} = 1,0376 \cdot e^{j0,86^\circ};$$

а потоа и величините \underline{g} и \underline{Z} со помош на изразите (7.9) и (7.10)

$$\underline{g} = \ln \left(\underline{Q} + \sqrt{\underline{Q}^2 - 1} \right) = (0,2786 + j0,0549) = 0,284 \cdot e^{j11,15^\circ};$$

$$\underline{Z} = \sqrt{\frac{\underline{Z}_r \cdot 2R_S}{2 + \underline{Z}_r/(2R_S)}} = (2,7704 + j0,5390) = 2,82 \cdot e^{j11,0^\circ} \Omega;$$

$$\text{Re} \{ \underline{g} \} = 0,2786;$$

$$n_d = \frac{3}{\text{Re} \{ \underline{g} \}} = 11.$$

Бидејќи е водот „долг“ ($n = 40 > 11$), за пресметка на влезната импеданција \underline{Z}_{vl} ќе го користиме упростениот израз (7.23). Како резултат се добива

$$\underline{Z}_{vl} \approx \sqrt{\underline{Z}_r \cdot R_S} - \frac{\underline{Z}_r}{2} = 2,452 \cdot e^{j9,38^\circ} \Omega.$$

□ □ □

Задача 7.1. Надземниот вод од примерот 7.1 е изведен со заштитно јаже тип Al/Ќ 95/55. Просечната вредност на отпорностите на распостирање на столбовите е $R_S = 10 \Omega$, а просечниот распон $a = 250 \text{ m}$. Да се пресмета влезната импеданција \underline{Z}_{vl} и граничниот број на распони n_d на водот.



Пример 7.7. Еден 110 kV ТС се напојува преку надземен вод е изведен со заштитно јаже тип Al/Џ 95/55. Просечната вредност на отпорностите на распростирање на заземјувачите на столбовите изнесува $R_S = 15 \Omega$. Карактеристиките на ЗС на надземниот вод се идентични со оние на водот од примерот 7.2. Специфичната отпорност на тлото во околината на самата ТС и по должината на трасата од водот изнесува $\rho = 300 \Omega\text{m}$. Отпорноста на распростирање на мрежестиот заземјувач на самата ТС 110/СН изнесува $R_{MZ} = 2 \Omega$.

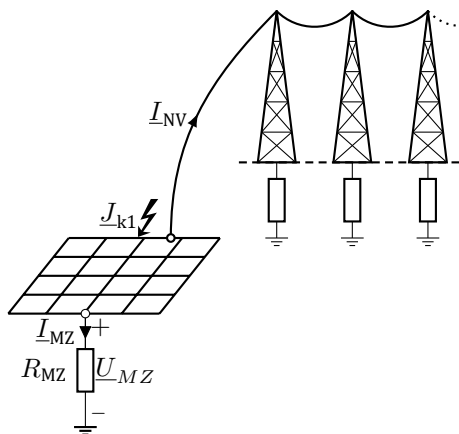
Струјата на еднофазна куса врска настаната на собирниците 110 kV на самата ТС што се инјектира во вкупниот ЗС изнесува $J_{k1} = 3 \text{ kA}$ ($S_{k1} = 2000 \text{ MVA}$).

Да се пресмета:

- а) потенцијалот на мрежестиот заземјувач U_{MZ} , односно потенцијалот на првот столб од НВ за време на грешката;
- б) уделот на струјата што се одведува преку мрежестиот заземјувач во земјата, изразена во kA и во %.
- в) колкави ќе бидат U_{MZ} и I_{MZ} во случајот кога во разгледуваната ТС влегуваат два надземни вода со исти карактеристики.

Решение

а) Случај кога еден вод влегува во посматраната ТС



Слика П.7.7.1

Во овој случај мрежестиот заземјувач и НВ формираат сложен ЗС кој што се состои од две импеданции импеданцијата $R_{MZ} = 2 \Omega$ на самиот

мрежест заземјувач и импеданцијата на заземјување (т.е. влезната импеданција) на ЗС од надземниот вод. Нејзината вредност е пресметана во претходниот пример и изнесува

$$\underline{Z}_{vl} = 1,712 \cdot e^{j28,1^\circ} \Omega = (1,51 + j0,81) \Omega.$$

Според тоа еквивалентата импеданција на целиот ЗС ќе биде паралелна врска од двете претходно споменати импеданции, т.е.

$$\underline{Z}_{ek} = R_{MZ} \Pi \underline{Z}_{vl} = \frac{2 \cdot (1,51 + j0,81)}{2 + (1,51 + j0,81)} = 0,951 \cdot e^{j15,2^\circ} \Omega.$$

Потенцијалот на мрежестиот заземјувач ќе биде

$$U_{MZ} = Z_{ek} \cdot J_{K1} = 0,951 \cdot 3 = 2,853 \text{ kV}.$$

Тоа ќе биде наедно и потенцијалот на првиот столб од надземниот вод. Вториот столб од НВ ќе има само 90,1% од овој потенцијал, т.е. само 2,52 kV (резултат добиен во претходниот пример).

Струјата I_{MZ} што се одведува во земјата преку мрежестиот заземјувач ќе биде

$$\underline{I}_{MZ} = \frac{\underline{Z}_{ek}}{R_{MZ}} \cdot \underline{J}_{k1} = \frac{\underline{Z}_{vl}}{\underline{Z}_{vl} + R_{MZ}} \cdot \underline{J}_{k1}.$$

Со замена на бројните вредности се добива

$$I_{MZ} = 0,476 \cdot J_{K1} = 0,476 \cdot 3 = 1,328 \text{ kA}.$$

Сходно на тоа, струјата што ќе се одведува преку ЗС на НВ ќе биде

$$\underline{I}_{NV} = \frac{\underline{Z}_{ek}}{\underline{Z}_{vl}} \cdot \underline{J}_{k1} = \frac{R_{MZ}}{\underline{Z}_{vl} + R_{MZ}} \cdot \underline{J}_{k1},$$

или

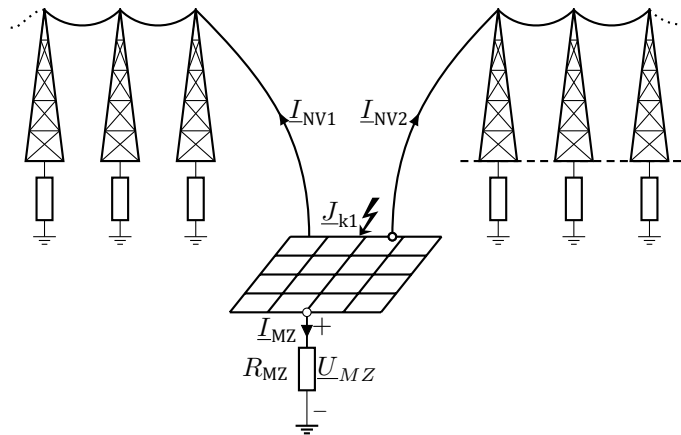
$$I_{NV} = 0,555 \cdot J_{K1} = 1,665 \text{ kA}.$$

Значи надземниот вод со својот ЗС помага поголемиот дел од струјата на грешалата да се одведе од местото на грешката, така што мрежестиот заземјувач ќе одведува приближно само 47,6% од вкупната струја во земја.

б) Случај кога два вода влегуваат во посматраната ТС

Постапувајќи на идентичен начин како и во претходниот случај со еден вод, сега се добива

$$\underline{Z}_{ek} = R_{MZ} \Pi \frac{\underline{Z}_{vl}}{2} = \frac{2 \cdot (1,51/2 + j0,81/2)}{2 + (1,51/2 + j0,81/2)} = 0,615 \cdot e^{j19,8^\circ} \Omega.$$



Слика П.7.7.2

Потенцијалот на мрежестиот заземјувач ќе биде

$$U_{MZ} = Z_{ek} \cdot J_{k1} = 0,615 \cdot 3 = 1,845 \text{ kV.}$$

Во овој случај уделот на мрежестиот заземјувач во одведувањето на струјата на грешката во земја ќе биде уште помал и ќе изнесува

$$I_{MZ} = \frac{Z_{ek}}{R_{MZ}} \cdot J_{k1},$$

$$I_{MZ} = \frac{0,615}{2} \cdot 3 = 0,923 \text{ kA.}$$

□ □ □

7.5 Решавање на моделот на заземјувачкиот систем на надземен вод со примена на матрици

7.5.1 Општ случај

На сликата 7.12 е прикажана општата еквивалентната шема на надземен вод со заштитно јаже со n столбови ($n - 1$ распон), третиран како елемент на заземјувачки систем. При тоа е земено дека секој столб k е претставен со отпорноста на својот заземјувач R_k , додека заштитното јаже во секој од распоните на водот е претставено со редна импеданција Z_k чиј што реден број одговара со редниот број од десната страна на распонот. За редната импеданција за секој од распоните можеме да напишеме

$$Z_k = z \cdot a_k, \quad (7.38)$$

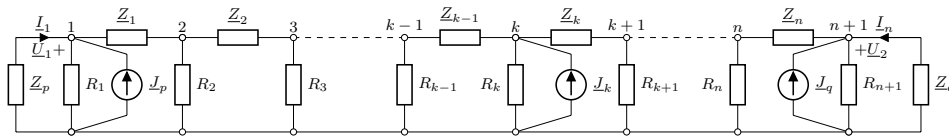
каде што \underline{z} е надолжната импеданција на заштитното јаже, а a_k е должината на распонот k .

Доколку кај столбот k настанала еднофазна куса врска на водот во еквивалентната шема се поставуваат три струјни генератори чиешто струи изнесуваат

$$\underline{J}_p = \frac{\underline{z}_m}{\underline{z}} \cdot \underline{I}_{k1}, \quad \underline{J}_q = \frac{\underline{z}_m}{\underline{z}} \cdot \underline{I}_{k2}, \quad \underline{J}_k = \left(1 - \frac{\underline{z}_m}{\underline{z}}\right) \cdot \underline{I}_k, \quad (7.39)$$

каде што \underline{I}_{k1} и \underline{I}_{k2} се струите на куса врска кои течат по фазниот проводник од лево и од десно кон столбот k , $\underline{I}_k = \underline{I}_{k1} + \underline{I}_{k2}$ е вкупната струја на куса врска, а \underline{z}_m надолжната меѓусебна импеданција помеѓу фазниот проводник и заштитното јаже.

Со импеданциите \underline{Z}_p и \underline{Z}_q се еквивалентирани заземјувачките системи на постројките на двата краја од водот.



Слика 7.12. Општа шема на заземјувачкиот систем на водот

Со помош на методот на независни напони (јазлови потенцијали) за едно електрично коло може да се напише следниот матричен систем равенки

$$\underline{Y} \cdot \underline{U} = \underline{I}, \quad (7.40)$$

којшто дава врска помеѓу напоните на независните јазли \underline{U} (сите јазли освен референтниот) и инјектираните струи \underline{I} .

Матрицата \underline{Y} која што се нарекува матрица на адмитанции на јазлите може да се добие на различни начини. Доколку во разгледуваното коло нема индуктивни спреги помеѓу одделни елементи (што е овде исполнето), матрицата \underline{Y} едноставно се определува со инспекција на мрежата

- Членот \underline{Y}_{kk} е еднаков на сумата на адмитанциите на сите елементи на кои им припаѓа јазелот k ,

Членот \underline{Y}_{kl} е еднаков на сумата на адмитанциите на сите елементи што директно ги поврзуваат јазлите k и l , со променет знак.

Според наведените правила, за колото од сликата 7.12 за елементите од матрицата \underline{Y} важи

$$\begin{aligned} \underline{Y}_{11} &= \frac{1}{\underline{Z}_1} + \frac{1}{R_1} + \frac{1}{\underline{Z}_p}, \\ \underline{Y}_{kk} &= \frac{1}{\underline{Z}_{k-1}} + \frac{1}{R_k} + \frac{1}{\underline{Z}_k}, \quad k = 2, 3, \dots, n-1, \\ \underline{Y}_{nn} &= \frac{1}{\underline{Z}_{n-1}} + \frac{1}{R_n} + \frac{1}{\underline{Z}_q}, \\ \underline{Y}_{k,k-1} &= -\frac{1}{\underline{Z}_{k-1}}, \quad k = 2, 3, \dots, n-1, \\ \underline{Y}_{k-1,k} &= \underline{Y}_{k,k-1}, \quad k = 2, 3, \dots, n-1. \end{aligned} \tag{7.41}$$

Според колото од сликата 7.12 за инјектираните струи во јазлите можеме да напишеме

$$\underline{I} = \left[\begin{array}{cccccc} \underline{J}_p & 0 & \cdots & 0 & \underline{J}_k & 0 & \cdots & \underline{J}_q \end{array} \right]^T, \tag{7.42}$$

од каде што се забележува дека векторот \underline{I} е полн со нули освен на првата, последната и на позицијата k каде што се наоѓаат вредностите на струите на трите генератори \underline{J}_p , \underline{J}_k и \underline{J}_q . Знакот T ја означува операцијата транспонирање на матрица.

Со решавање на системот равенки (7.38), на пример со помош на матрична инверзија, ги добиваме напоните на сите столбови на водот

$$\underline{U} = \underline{Y}^{-1} \cdot \underline{I}. \tag{7.43}$$

7.6 Одредување на параметрите на π -еквивалентната шема на водот

Во случаите кога не постои струјниот генератор \underline{J}_k , т.е. нема еднофазна куса врска некаде по должината на водот туку таа е на неговите креави или во некој друг дел од системот во којшто се наоѓа разгледуваниот вод можно е неговата еквивалентна шема да се замени со π -заменска шема како на сликата 7.13.

Бидејќи во овој случај сакаме да направиме еквиваленција со π -шема само на надземниот вод, а импеданциите на постројките на двата краја од водот \underline{Z}_p и \underline{Z}_q да останат нееквивалентирани треба да направиме матрица \underline{Y} во којашто тие нема да бидат земени предвид. Матрицата \underline{Y} повторно ќе ја направиме како во претходниот случај со таа разлика што во првиот и последниот дијагонален елемент нема да ги додадеме

членовите со \underline{Z}_p и \underline{Z}_n т.е. тука ќе важи

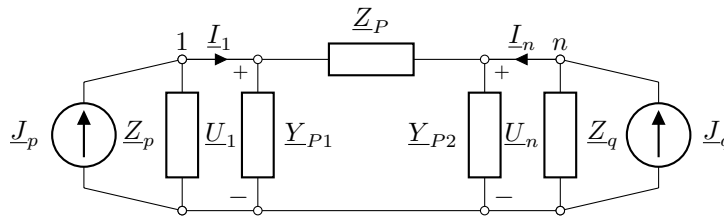
$$\begin{aligned} \underline{Y}_{11} &= \frac{1}{\underline{Z}_1} + \frac{1}{R_1}, \\ \underline{Y}_{nn} &= \frac{1}{\underline{Z}_{n-1}} + \frac{1}{R_n}. \end{aligned} \quad (7.44)$$

Со инверзија на матрицата \underline{Y} се добива матрицата на адмитанции \underline{Z}

$$\underline{Z} = \underline{Y}^{-1}, \quad (7.45)$$

чиито елементи го имаат следното физичко значење

- членот \underline{Z}_{kk} е еднаков на влезната импеданција во јазелот k ,
- членот \underline{Z}_{kl} е еднаков на меѓусебната импеданција помеѓу јазлите k и l . Со него може да се пресмета вредноста на напонот во јазелот k ако во јазелот l се инјектира позната струја \underline{I}_l . При тоа важи $\underline{U}_k = \underline{Z}_{kl} \cdot \underline{I}_l$.



Слика 7.13. π -заменска шема на заземјувачкиот систем на водот

Еквивалентното коло од сликата 7.13 можеме да го добиеме така што од еквивалентното коло од сликата 7.12 ќе ги елиминираме јазлите со редни броеви од 2 до $n - 1$ коишто тука не се од интерес. Елиминацијата на овие јазли е можна затоа што инјектираните струи во сите од нив се еднакви на нула, т.е. важи $\underline{I}_2 = 0, \underline{I}_3 = 0, \dots, \underline{I}_{n-1} = 0$. Со помош на матрицата \underline{Z} за напонот на јазелот 1 можеме да напишеме

$$\underline{U}_1 = \underline{Z}_{11} \cdot \underline{I}_1 + \underline{Z}_{12} \cdot \underline{I}_2 + \underline{Z}_{13} \cdot \underline{I}_3 + \dots + \underline{Z}_{1n} \cdot \underline{I}_n, \quad (7.46)$$

што се сведува на

$$\underline{U}_1 = \underline{Z}_{11} \cdot \underline{I}_1 + \underline{Z}_{1n} \cdot \underline{I}_n. \quad (7.47)$$

На сличен начин се добива

$$\underline{U}_n = \underline{Z}_{n1} \cdot \underline{I}_1 + \underline{Z}_{nn} \cdot \underline{I}_n. \quad (7.48)$$

Последните две релации можеме да ги напишеме во матрична форма на следниот начин

$$\begin{bmatrix} \underline{U}_1 \\ \underline{U}_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{Z}_{11} & \underline{Z}_{1n} \\ \underline{Z}_{n1} & \underline{Z}_{nn} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \underline{I}_1 \\ \underline{I}_n \end{bmatrix} = \underline{Z}' \cdot \begin{bmatrix} \underline{I}_1 \\ \underline{I}_n \end{bmatrix} \quad (7.49)$$

каде што е воведена матрицата

$$\underline{Z}' = \begin{bmatrix} \underline{Z}_{11} & \underline{Z}_{1n} \\ \underline{Z}_{n1} & \underline{Z}_{nn} \end{bmatrix}. \quad (7.50)$$

со чија што инверзија се добива матрицата на адмитанции за водот од колото од сликата 7.13

$$\underline{Y}' = (\underline{Z}')^{-1}. \quad (7.51)$$

Со инспекција на колото од сликата 7.13 за матрицата на адмитанции можеме да напишеме

$$\underline{Y}' = \begin{bmatrix} \underline{Y}_{P1} + \frac{1}{\underline{Z}_P} & -\frac{1}{\underline{Z}_P} \\ -\frac{1}{\underline{Z}_P} & \underline{Y}_{P2} + \frac{1}{\underline{Z}_P} \end{bmatrix}. \quad (7.52)$$

при што повторно не се земени предвид импеданциите на постројките на двата краја од водот коишто не сакаме да влезат во π -еквивалентната шема.

Од релацијата (7.52) може да се заклучи дека дека важат следните релации

$$\begin{aligned} \underline{Z}_P &= -\frac{1}{\underline{Y}'_{12}}, \\ \underline{Y}_{P1} &= \underline{Y}'_{11} - \frac{1}{\underline{Z}_P} = \underline{Y}'_{11} + \underline{Y}'_{12}, \\ \underline{Y}_{P2} &= \underline{Y}'_{22} - \frac{1}{\underline{Z}_P} = \underline{Y}'_{22} + \underline{Y}'_{12}. \end{aligned} \quad (7.53)$$

Пример 7.8. Повторно го рагледуваме примерот 7.4. Еден 110 kV надземен вод е изведен со заштитно јаже со позната надолжа импеданција $\underline{z} = (0, 564 + j0, 767) \Omega/\text{km}$, а познато е и надолжната меѓусебна импеданција која што изнесува $\underline{z}_m = (0, 05 + j0, 354) \Omega/\text{km}$. Просечната вредност на отпорностите на распростирање на заземјувачите на столбовите изнесува $R_S = 10 \Omega$. Водот е долг $l = 10 \text{ km}$ и има вкупно $n = 40$ распони. Еквивалентната импеданција на постројката на почетокот од водот изнесува $Z_p = (0, 4 + j0) \Omega$, а на крајот од водот изнесува $Z_q = (0, 5 + j0) \Omega$. Во задачата водот да се посматра идеализирано, т.е. да се претпостави дека сите столбови имаат иста вредност на отпорноста R_S и сите распони се со иста должина $a = l/n = 250 \text{ m}$. Да се одредат

- а) Влезната (еквивалентната) импеданција на водот на неговиот почеток $\underline{Z}_{vl} = \underline{U}_1/\underline{I}_1$ и факторот на изнесениот потенцијал $k_i = \underline{U}_n/\underline{U}_1$.

- б) Параметрите на π -заменската шема на заземјувачкиот систем на водот.
- в) Факторите на изнесени потенцијали за сите столбови по должината на водот, а потоа да се пресметаат потенцијалите на столбовите 3 и 18 во случај кога напонот на почетокот на водот изнесува $\underline{U}_1 = 1200 \text{ V}$.
- г) Напоните на сите столбови ако е познато дека на столбот број 7 настанала еднофазна куса врска при што по фазните проводници течат струи $\underline{I}_{k1} = 1700 \text{ A}$ и $\underline{I}_{k2} = 1000 \text{ A}$.
- д) Напоните на сите столбови ако се познати напоните на двата краја од водот $\underline{U}_1 = 238 \cdot e^{j33,8^\circ} \text{ V}$ и $\underline{U}_2 = 523 \cdot e^{-j8,6^\circ} \text{ V}$.

Решение

- а) Влезна импеданција на водот

Податоците за водот ги задаваме на следниот начин

programi/vodovi/vod_1.m

```
1 function vod = vod_1()
2 vod.Rs = 10*ones(41,1);
3 vod.Zr = (0.141+1j*0.192)*ones(40,1);
4 vod.Zp = 0.4;
5 vod.Zq = 0.5;
6 vod.z = 0.564 + 1j*0.767;
7 vod.zm = 0.05 + 1j*0.354;
```

каде што се гледа дека тие се дадени во форма на функцијата која што ја враќа структурата `vod` која ги има следнит полиња `vod.Rs`, `vod.Zr`, `vod.Zp`, `vod.Zq`, `vod.z` и `vod.zm`.

Согласно условите во примерот, векторот `vod.Rs` содржи 41 елемент со вредности еднакви на 10 кои ги претставуваат отпорностите на заземјувачите на столбовите од водот. Во векторот `vod.Zr` се дадени импеданциите на заштитното јажи во сите 40 распони на водот (сите тие изнесуваат $0,141 + j0,192$). Во скаларите `vod.Zp` и `vod.Zq` се дадени импеданциите \underline{Z}_p и \underline{Z}_q . Надолжната импеданција за заштитното јаже и меѓусебната надолжна импеданција помеѓу заштитното јаже и фазниот спроводник се дадени во `vod.z` и `vod.zm`, соодветно.

Матрицата \underline{Y} ја добиваме со функцијата `mat_y`

Програма 7.1. Формирање на матрицата \underline{Y} (programi/vodovi/mat_y.m)

```
1 function [Y,n] = mat_y(datoteka)
2 vod = feval(datoteka);
3 [Rs,Zr] = deal(vod.Rs,vod.Zr);
4 n = length(vod.Rs);
5 Y = sparse(n,n);
6 Y(1,1) = 1/Zr(1) + 1/Rs(1);
```

```

7 for k = 2:n-1
8     Y(k,k) = 1/Zr(k-1) + 1/Zr(k) + 1/Rs(k);
9 end
10 Y(n,n) = 1/Zr(n-1) + 1/Rs(n);
11 for k = 2:n
12     Y(k,k-1) = -1/Zr(k-1);
13     Y(k-1,k) = Y(k,k-1);
14 end

```

каде што лесно се идентификува дека во неа се напишани изразите (7.41) со кои се дефинирани елементите на матрицата.

Влезната импеданција и коефициентот на изнесенiot потенцијал ги добиваме со функцијата zvl_k

Програма 7.2. Пресметка на влезната импеданција и коефициентот на изнесенiot потенцијал (programi/vodovi/zvl_k.m)

```

1 function [Zvl,k,Z] = zvl_k(datoteka)
2 [Y,n] = mat_y(datoteka);
3 vod = feval(datoteka);
4 Y(n,n) = Y(n,n) + 1/vod.Zq;
5 I = [1; zeros(n-1,1)];
6 Z = Y\I;
7 Zvl = Z(1);
8 k = Z(n)/Z(1);

```

која како влезен параметар ја има променливата $datoteka$ во која е дадено името на датотека со податоците за водот, а како излез од функцијата се добива влезната импеданција Zvl , коефициентот на изнесен потенцијал k и векторот Z кој е првата колона од матрицата Z . Функцијата zvl_k се состои од следните главни делови

- ① Вчитување на податоците од влезната датотека и формирање на матрицата Y . Во елементот Y_{nn} се додава членот $1/Z_q$.
- ② Определување на првата колона од матрицата Z така што во јазелот 1 се инјектира струја од 1 A и се решава системот равенки $Y \cdot U = I$, каде што во векторот I сите елементи се еднакви на 0, освен првиот кој е еднаков на 1. Елементите од првата колона на Z се еднакви на пресметаните напони во овој специјален случај.
- ③ Пресметка на Z_{vl} и k_i . Влезната импеданција, која што е еднаква на Z_{11} , е всушност еднаква на првиот елемент од векторот Z (кој е првата колона од Z). Коефициентот на изнесен потенцијал е еднаков на U_{41}/U_1 , што тука е $Z(n)/Z(1)$.

Со командата

```

>> [Zvl,k] = zvl_k('vod_1')
Zvl =
    1.3072 + 0.6057i
k =
   -0.0020 - 0.0000i

```

ги добиваме влезната импеданција и коефициентот на изнесен потенцијал.

б) Параметри на π -заменската шема на водот

Параметрите на π -заменската шема ги добиваме со функцијата `vod_pi`

Програма 7.3. Определување на елементите на π -заменската шема (programi/vodovi/vod_pi.m)

```

1 function [Zp,Yp1,Yp2] = vod_pi(datoteka)
2 [Y,n] = mat_y(datoteka);
3 I = zeros(n,2);
4 I(1,1) = 1;
5 I(n,2) = 1;
6 Z = Y\I;
7 Z1 = [
8     Z(1,1) Z(1,2)
9     Z(n,1) Z(n,2)
10    ];
11 Y1 = Z1^-1;
12 Zp = -1/Y1(1,2);
13 Yp1 = Y1(1,1) + Y1(1,2);
14 Yp2 = Y1(2,2) + Y1(1,2);

```

во која влезен параметар е променливата `datoteka` со податоците за водот, а како излез од функцијата се добиваат параметрите на π -заменската шема Z_p , Y_{p1} и Y_{p2} . Од функцијата ќе ги истакнеме следните делови

- ① Формирање на матрицата \underline{Y} со помош на функцијата `mat_y`.
- ② Определување на првата и последната колона од матрицата \underline{Z} така што во јазелот 1 и n се инјектираат струии од 1 A и се решава системот равенки $\underline{Y} \cdot \underline{U} = \underline{I}$. Во векторот \underline{I} има 2 колони при што сите елементи се еднакви на 0, освен првиот во првата колона и последниот во втората колона кои се еднакви на 1. Овие две колони се користат за формирање на матрицата \underline{Z}' според (7.50).
- ③ Определување на матрицата на \underline{Y}' и параметрите \underline{Z}_p , \underline{Y}_{p1} и \underline{Y}_{p2} според (7.53).

Бараните параметри ги добиваме со командата

```

>> [Zp,Yp1,Yp2] = vod_pi('vod_1')
Zp =
-1.8870e+02 - 2.0341e+01i
Yp1 =
0.6350 - 0.2924i
Yp2 =
0.6350 - 0.2924i

```

в) Фактори на изнесените потенцијали

Напоните на сите столбови можеме да ги пресметаме со следната куса програма

programi/vodovi/vod_naponi.m

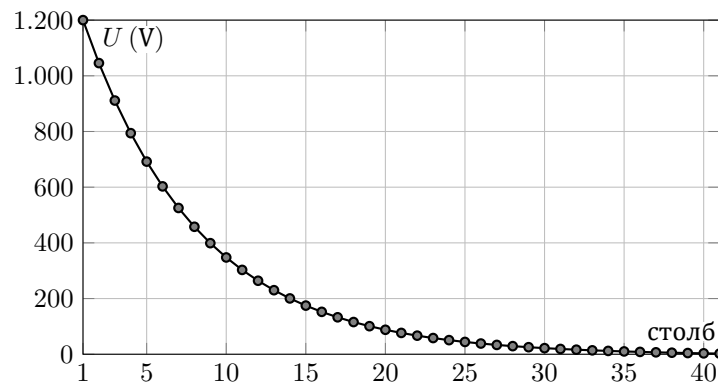
```
1 function U = vod_naponi(datoteka,U1)
2 [Zvl,k,Z] = zvl_k(datoteka);
3 k = Z/Z(1);
4 U = k*U1;
```

во која ја користиме функцијата `zvl_k` за да го добиеме векторот Z кој е еднаков на првата колона од матрицата \underline{Z} . Коефициентите на изнесени потенцијали за сите столбови се еднакви на нивните потенцијали поделени со потенцијалот на првиот столб, т.е. $k = Z/Z(1)$. Вистинските потенцијали ќе ги добиеме така што коефициентите на изнесен потенцијал ќе ги поможеме со потенцијалот на првиот столб којшто е даден во променливата $U1$.

Потенцијалите на столбовите 3 и 18 можеме да ги добиеме на следниот начин

```
>> U = vod_naponi('vod_1',1200);
>> abs(U([3 18]))
ans =
    911.1734
    115.6573
```

Дополнително, со командата `plot(abs(U))` можеме да ја нацртаме промената на потенцијалот по должината на водот, т.е. потенцијалите на сите столбови кои се дадени на следната слика.



Слика П.7.8.1. Потенцијали на столбовите

г) Напони на столбовите

Пресметката на потенцијалите во овој случај ќе ја направиме со функцијата `vod_naponi_opsto`. Во неа влезни параметри се `datoteka` во која е дадено името на датотека со податоците за водот, `Ik1` и `Ik2` кои се вредностите на струите кои течат од лево и од десно кон местото на куса врска и променливата `k` со која е зададен редниот број на столбот кај кој настанала кусата врска. Како излез од функцијата се добива векторот `U` со потенцијали на сите столбови.

**Програма 7.4. Пресметка на потенцијали на столбовите
(programi/vodovi/vod_naponi_opsto.m)**

```

1 function U = vod_naponi_opsto(datoteka, Ik1, Ik2, k)
2 vod = feval(datoteka);
3 [Y,n] = mat_y(datoteka);
4 Y(1,1) = Y(1,1) + 1/vod.Zp;
5 Y(n,n) = Y(n,n) + 1/vod.Zq;
6 rf = 1 - vod.zm/vod.z;
7 Jp = (1-rf) * Ik1;
8 Jq = (1-rf) * Ik2;
9 Jk = rf * (Ik1 + Ik2);
10 I = zeros(n,1);
11 I(1) = Jp;
12 I(k) = Jk;
13 I(n) = Jq;
14 U = Y\I;

```

Во функцијата `vod_naponi_opsto` можеме да ги истакнеме следните делови

- ① Формирање на матрицата \underline{Y} со помош на функцијата `mat_y`. На елементите \underline{Y}_{11} и \underline{Y}_{nn} им се додава $1/\underline{Z}_p$ и $1/\underline{Z}_q$, соодветно.
- ② Пресметување на редукционит фактор на водот и струите на трите струјни генератори \underline{J}_p , \underline{J}_k и \underline{J}_q .
- ③ Формирање на векторот со струјни инјекции и пресметка на потенцијалите на столбовите со решавање на системот равенки $\underline{Y} \cdot \underline{U} = \underline{I}$.

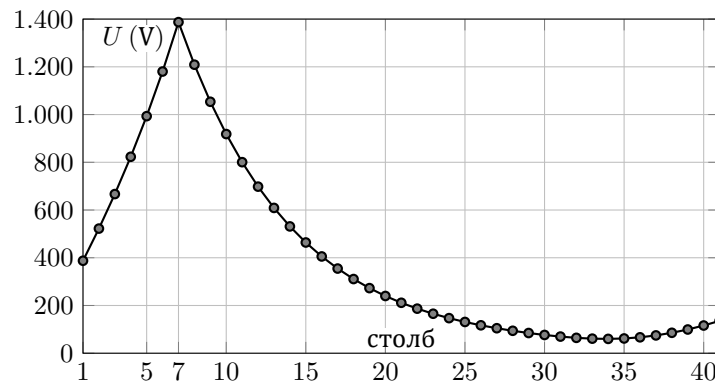
Потенцијалите на столбовите во конкретниот случај можеме да ги пресметаме со следната команда

```
>> U = vod_naponi_opsto('vod_1', 1700, 1000, 7);
```

со што ги добиваме вредностите дадени во табелата П.7.8.1, кои се прикажани и на сликата П.7.8.2.

Табела П.7.8.1. Потенцијали на столбовите при еднофазна куса врска кај столбот 7

Бр.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
U (V)	387	522	667	823	993	1180	1387	1209	1054	918	
Бр.	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	
U (V)	800	698	609	531	464	405	355	311	273	240	
Бр.	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	
U (V)	211	187	165	147	131	117	105	94	85	77	
Бр.	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41
U (V)	70	64	61	60	62	67	75	86	99	116	136



Слика П.7.8.2. Потенцијали на столбовите при еднофазна куса врска кај столбот 7

д) Напони на столбовите при познати напони на почетокот и крајот од водот

Потенцијалите на столбовите ќе ги пресметаме со решавање на системот равенки $\underline{Y} \cdot \underline{U} = \underline{I}$, но претходно ќе треба да го формираме векторот на инјектираните струи \underline{I} . Во него сите елементи ќе бидат нули освен инјектираните струи во јазлите 1 и n . Нив можеме да ги пресметаме со помош на π -шештата од сликата 7.13. Тие изнесуваат

$$\underline{I}_1 = \frac{U_1 - U_n}{Z_P} + \underline{Y}_{P1} \cdot U_1$$

$$\underline{I}_n = \frac{U_n - U_1}{Z_P} + \underline{Y}_{P2} \cdot U_{41}.$$

Пресметката на потенцијалите ќе ја направиме со функцијата `vod_naponi_ulun`. Во неа влезни параметри се `datoteka` во која е

дадено името на датотеката со податоците за водот, U_1 и U_n кои се вредностите на потенцијалите на првиот и последниот столб на водот. Како излез од функцијата се добива векторот U со потенцијали на сите столбови.

Програма 7.5. Пресметка на потенцијали на столбовите при познати потенцијали на неговите краеве (programi/vodovi/vod_naponi_ulun.m)

```

1 function U = vod_naponi_ulun(datoteka,U1,Un)
2 [Zp,Yp1,Yp2] = vod_pi(datoteka);
3 [Y,n] = mat_y(datoteka);
4 I = zeros(n,1);
5 I(1) = (U1-Un)/Zp + Yp1*U1;
6 I(n) = (Un-U1)/Zp + Yp2*Un;
7 U = Y\I;

```

Функцијата `vod_naponi_ulun` е поделена на два дела

- ① Пресметка на параметрите Z_P , Y_{P1} и Y_{P2} од π -заменската шема на водот со помош на функцијата `vod_pi` и формирање на матрицата Y со помош на функцијата `mat_y`.
- ② Формирање на векторот со струјни инјекции и пресметка на потенцијалите на столбовите со решавање на системот равенки $Y \cdot U = I$.

Потенцијалите на столбовите ги пресметуваме со следните команди

```

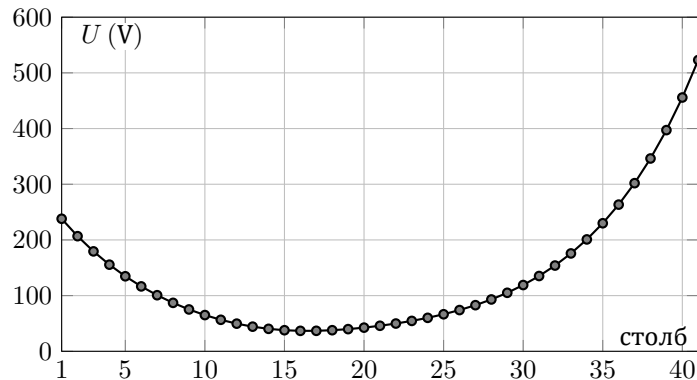
>> U1 = 238*exp(1j*33.8/180*pi);
>> Un = 523*exp(-1j*8.6/180*pi);
>> U = vod_naponi_ulun('vod_1',U1,Un);

```

со што ги добиваме вредностите дадени во табелата П.7.8.2, кои се прикажани и на сликата П.7.8.3.

Табела П.7.8.2. Потенцијали на столбовите при познати потенцијали на неговите краеве

Бр.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
U (V)	238	207	179	156	135	117	101	87	75	65	
Бр.	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	
U (V)	57	50	44	40	38	37	37	38	40	43	
Бр.	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	
U (V)	46	50	55	60	67	74	83	93	105	119	
Бр.	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41
U (V)	135	154	176	201	230	263	302	346	397	456	523



Слика П.7.8.3. Потенцијали на столбовите при познати потенцијали на неговите краеве



Пример 7.9. Кај водот од примерот 7.4 е направено подобрување на заземјувачите на првите 5 столбови од почетокот на водот со што нивната отпорност е намалена на $R_S' = 5 \Omega$, додека останатите податоци за водот остануваат исти. Да се одреди

- Влезната (еквивалентната) импеданција на водот на неговиот почеток $Z_{vl} = \frac{U_1}{I_1}$.
- Потенцијалот на заземјувачот во трафостаницата на почетокот од водот ако е познато дека во неа настанала еднофазна куса врска при што струјата изнесува $I_k = 3000$ А. Резултатите да се споредат со резултатите од примерот 7.4.
- Вредностите на елементите од π -заменската шема на водот.

Решение

а) Влезна импеданција на водот

Податоците за водот се дадени во следната датотека

programi/vodovi/vod_2.m

```

1 function vod = vod_2()
2 vod.Rs = [5*ones(5,1); 10*ones(36,1)];
3 vod.Zr = (0.141+1j*0.192)*ones(40,1);
4 vod.Zp = 0.4;
5 vod.Zq = 0.5;
6 vod.z = 0.564 + 1j*0.767;
7 vod.zm = 0.05 + 1j*0.354;

```

во која што гледаме дека, за разлика од претхдно, векторот `vod.Rs` е сменет и тој се состои од низа од 5 броеви со вредност 5 по која

следува низа од 36 броеви со вредност 10, т.е. тој е $[5 \cdot \text{ones}(5,1); 10 \cdot \text{ones}(36,1)]$.

Влезната импеданција на водот ја добиваме на следниот начин

```
>> Zvl = zvl_k('vod_2')
Zvl =
    0.9508 + 0.3758i
```

што значи имаме $\underline{Z}_{vl} = 1,0223 \cdot e^{j21,6^\circ} \Omega$.

Се забележува дека модулот на влезната импеданција изнесува 71% од модулот на истата таа импеданција во примерот 7.4. Тоа значи дека со интервенција на заземјувачите само на краток дел од почетокот на водот влезната импеданција може значително да се намали. Во случај на еднофазна куса врска во трафостаницата на почетокот на водот помалата влезна импеданција ќе доведе до течење на поголема струја кон самиот вод со што ќе се намали вредноста на струјата која што ќе оди во заземјувачот на трафостаницата. Тоа, пак, значи дека напонот на заземјувачот на трафостаницата ќе биде помал, а со тоа ќе се намалат и опасностите во неа.

б) Потенцијал на заземјувачот

Потенцијалот на заземјувачот во трафостаницата на почетокот на водот изнесува

$$\underline{U}_1 = \underline{Z}_e \cdot I_k = \frac{\underline{Z}_{vl} \cdot \underline{Z}_p}{\underline{Z}_{vl} + \underline{Z}_p} \cdot I_k,$$

а тоа во Matlab е напишано на следниот начин

```
Ik = 3000;
Zp = 0.4;
Ze = Zp*Zvl/(Zp + Zvl);
U = Ze*Ik
U =
    8.7017e+02 + 9.1753e+01i
```

од каде што гледаме дека ефективната вредност на потенцијалот изнесува $U_1 = 875 \text{ V}$.

Доколку ја примениме истата постапка во примерот 7.4, при истата вредност на струјата на куса врска, ќе добиеме $U_1 = 954 \text{ V}$, што значи дека подобрувањето на заземјувачите на првите пет столбови придонесува кон намалување на напонот на мрежестиот заземјувач. Тоа е во согласност со претходната констатација за значењето на помалата вредност на влезната импеданција на водот.

в) Параметри на π -заменската шема на водот

Елементите од π -заменската шема на водот ги добиваме на следниот начин

```
>> [Zp, Yp1, Yp2] = vod_pi('vod_2')
Zp =
-2.0832e+02 - 4.4862e+01i
Yp1 =
0.9143 - 0.3605i
Yp2 =
0.6344 - 0.2928i
```

од каде што се забележува дека $\underline{Y}_{P1} \neq \underline{Y}_{P2}$ бидејќи водот е несиметричен поради нееднаквите отпорности на заземјување на неговите столбови.

□ □ □

Задача 7.2. Да се пресмета потенцијалот на мрежестиот заземјувач на трафостаницата на почетокот од водот при еднофазна куса со струјата $I_k = 3000$ А ако е познато дека во таа трафостаница се поврзани два вода при што за нивните карактеристики се разгледуваат следните три случаи

- а) Двата вода имаат карактеристики како во примерот 7.4,
- б) Двата вода имаат карактеристики како во примерот 7.9,
- в) Едниот вод има карактеристики како во примерот 7.4, а другиот како во примерот 7.9.

□ □ □

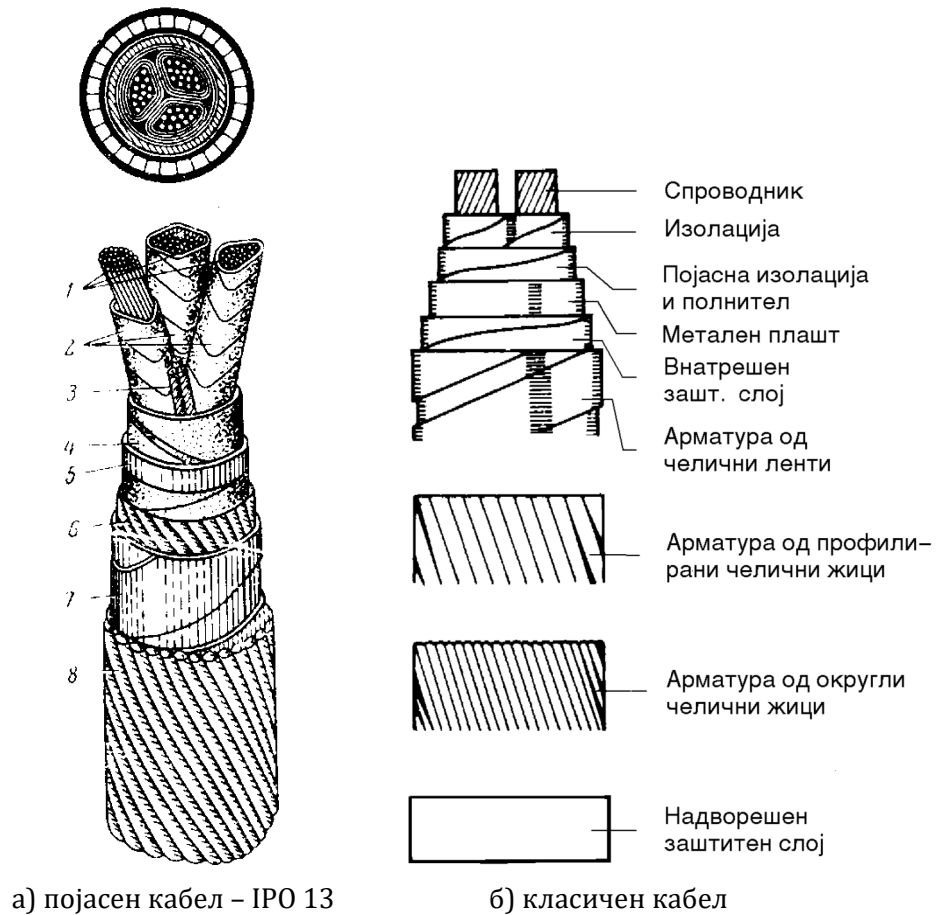
8

ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТСКИ КАБЛИ ВО ЗАЗЕМЈУВАЧКИОТ СИСТЕМ

8.1 Општо за електроенергетските кабли и нивната улога

Под поимот *електроенергетски кабел* подразбираме извесен број спроводници изработени од добро спроводен материјал (бакар, алуминиум), изолирани како во однос на околината, така и во однос еден на друг. Тие се сместени во заедничка обвивка која има форма на безрабна цевка, изработена од метал (олово Pb, бакар Cu, алуминиум Al и друго) или, пак, од синтетичка изолациона материја (поливинилхлорид PVC, полиетилен PE, гума), наречена *внатрешен заштитен слој* или *плашт* на кабелот. Плаштот го штити кабелот од надворешните влијанија (влага, механички оштетувања, корозија и друго) (слика 8.1). Спроводниците, заедно со нивната изолацијата ги формираат жилите на кабелот. Тие се единствениот активен дел на кабелот којшто ја врши неговата основна функција – спроведување на струјата. Сите останати елементи од неговата конструкција имаат помошна, најчесто заштитна, улога.

Основната задача на електроенергетските кабли е пренос и распределба на електричната енергија до потрошувачите во мрежата. Но тие учествуваат и во работата на заземјувачкиот систем на мрежата бидејќи каблите со металните делови од својата конструкција (метален плашт, челична арматура, заштитни и сигнални спроводници) ги поврзуваат заземјувачите на соседните постројки. Некои видови кабли кои имаат неизолиран метален плашт, ја имаат и улогата на заземјувачи бидејќи при земјоспој во мрежата од металниот плашт на кабелот, кој за време на земјоспојот добива некаков потенцијал, се одведува струја во земјата.



Слика 8.1. Конструктивни елементи на кабли

Легенда: 1) Бакарни или алуминиумски жили; 2) Фазна изолација од импрегнирана хартија (IP); 3) Полнител од јута; 4) Појасна изолација од импрегнирана хартија; 5) Оловен (или Al-плашт); 6) Заштитен слој од јута; 7) Арматура (оклоп од челични ленти); 8) Надворешен заштитен слој од јута.

Значи каблите со своето присуство влијаат во голема мера врз карактеристиките на заземјувачкиот систем од мрежата на која и припаѓаат. Затоа во наредниот дел од оваа глава ќе бидат проучени и анализирани карактеристичните својства на одделните видови кабли, посматрани како елементи на заземјувачкиот систем на електроенергетските мрежи.

8.2 Кабли со неизолиран метален плашт

Околу половина од должината на СН дистрибутивна кабелска мрежа во Република Македонија е изведена со класични кабли од типот IPO 13 (NPO 13) и IPZO 13 (NPZO 13) и покрај тоа што овие видови кабли, како технолошки застарени и незгодни за одржување, веќе подолго време не се произведуваат а и не се вградуваат повеќе во мрежите практично никаде во светот. Тие постепено се заменуваат со кабли од поновата генерација кои имаат синтетичка изолација од полиетилен (PE) или вмрежен полиетилен (XLPE)

Сепак класичните кабли постојат во нашите мрежи и од тие причини овде ќе ги проучиме нивната конструкција, нивните карактеристики и нивното поведење гледано од аспект на елементи од ЗС на мрежата.

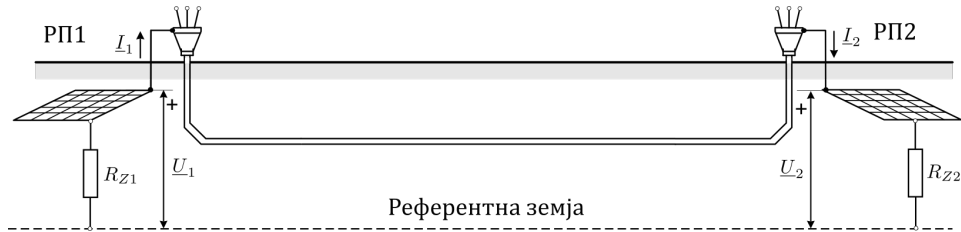
На сликата 8.1 се прикажани изгледот и конструкцијата на еден таков класичен кабел. Еден класичен кабел ги содржи следните конструктивни елементи: 1) спроводници од бакар или алуминиум; 2) фазна изолација од импрегнирана хартија (IP); 3) исполонувач на просторот (полнител - filler) од јута; 4) појасна изолација од импрегнирана хартија; 5) метален плашт (оловен или алуминиумски); 6) внатрешен заштитен слој од јута; 7) механичка заштита или армиатура (оклоп од челични поцинкувани ленти или жици); 8) надворешен заштитен слој од импрегнирана или асфалтирана јута.

Деталите за одделните конструктивни елементи, нивната изведба, намена и задача можат поподробно да се најдат во учебниците [20] и [21].

Експерименталните истражувања покажале дека кога еден таков кабел ќе се постави во земјата, неговиот надворешен заштитен слој, којшто ја има улогата на антикорозивна заштита на челичната армиатура и на металниот плашт на кабелот, после само неколку месеци ќе прими извесно количество влага, доволно за да стане електрички спроводен. На тој начин металната армиатура односно плашт ќе добијат добар електричен контакт со околното земјиште и стануваат спроводници т.е. електроди, односно елементи на заземјувачкиот систем. Кога ќе дојде до појава на земјоспој во мрежата металните делови од кабелот (челична армиатура, метален плашт и др.) добиваат извесен потенцијал и во нив започнува да тече струја. Дел од таа струја излегува од кабелот и истечува во земјата по целата негова должина, а дел од струјата тече и надолжно (лонгитудинално), по металните елементи на конструкцијата од едниот крај на кабелот којшто има повисок потенцијал, кон другиот крај – во заземјувачот на постројката со понизок потенцијал.

8.2.1 Струи и напони на металниот плашт

Ќе посматраме кабел со метален плашт и спроводен надворшен заштитен слој (кабел со неизолиран метален плашт), положен во земјата (слика 8.2).



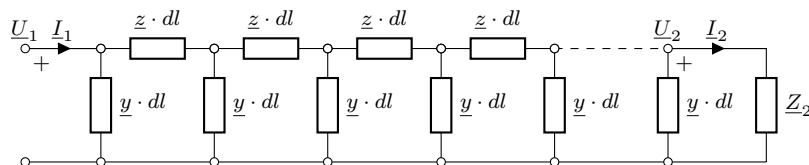
Слика 8.2. Кабел со неизолиран метален плашт поставен во земјата

На сликата 8.2 со РП1 и РП2 се означени првата односно втората постојка што ги поврзува кабелот, со R_{Z1} и R_{Z2} се означени отпорностите на распростирање на заземјувачите во тие постојки, додека со U_1 , I_1 и U_2 , I_2 се означени напонот и струјата во плаштот, соодветно.

Ако претпоставиме дека до дефект дошло во првата постројка РП1 тогаш насоките на струите I_1 и I_2 ќе бидат соодветни на оние, прикажани на сликата 8.2.

Нека со Z_2 ја означиме еквивалентната импеданција на заземјувањето кај постројката РП2. Таа би била еквивалентна импеданција (т.е. паралелна комбинација од импеданциите) на сите елементи приклучени во оваа постројка со исклучок на импеданцијата на посматраниот кабел.

На сликата 8.3 е прикажана еквивалентната електрична шема на кабелот прикажана на сликата 8.2 која ќе ни послужи за пресметување на струјните и напонските прилики во плаштот по должината на набљудуваниот кабел. Во неа е занемарена отпорноста r_z по единица должина ($r_z \approx 0,05 \Omega/\text{km}$) со која се опфаќа активната отпорност на повратниот пат на струјата во земјата како занемарливо мала во однос на останатите импеданции и отпорности.



Слика 8.3. Еквивалентна електрична шема на кабел од сликата 8.2

Во шемата од сликата 8.3 со $\underline{z} = r + jx$ е означена надолжната импеданција по km должина на плаштот од кабелот со која тој се спротивставува на надолжното течење на струјата, додека со \underline{y} е означена напречната адмитанција по единица должина. Обете споменати величини се однесуваат на единица должина на кабелот. Со dl е означен елементарен дел од должината на кабелот. Адмитанцијата по единица должина \underline{y} има чисто кондуктивен карактер. Таа се добива (приближно) кога вкупната адмитанција на кабелот $Y_Z = 1/R_Z$ се подели со неговата должина l .

Ако кабелот го третираме како хоризонтален спроводник со должина l и пречник d , закопан на длабочина h во хомогено тло со специфична отпорност ρ , тогаш ќе имаме

$$R_Z = \frac{\rho}{\pi \cdot l} \cdot \ln \frac{l}{\sqrt{h \cdot d_k}}, \quad (8.1)$$

$$\underline{Y}_Z = \frac{1}{R_Z} = \frac{\pi \cdot l}{\rho \cdot \ln \frac{l}{\sqrt{h \cdot d_k}}}, \quad (8.2)$$

$$\underline{y} = g + jb = \frac{\underline{Y}_Z}{l} = \frac{\pi}{\rho \cdot \ln \frac{l}{\sqrt{h \cdot d_k}}}, \quad (8.3)$$

$$g = \frac{\pi}{\rho \cdot \ln \frac{l}{\sqrt{h \cdot d_k}}}, \quad b = 0. \quad (8.4)$$

Ако сега на шемата од сликата 8.3 ги примениме општите равенки од типот (7.6) што важеа за надземните водови, ќе ги добиеме следните релации што постојат помеѓу приликите ($\underline{U}_1, \underline{I}_1$) на почетокот и ($\underline{U}_2, \underline{I}_2$) на крајот од плаштот на кабелот [2]

$$\begin{aligned} \underline{U}_1 &= \underline{U}_2 \cdot \text{ch} \underline{\gamma} l + \underline{Z}_C \cdot \underline{I}_2 \cdot \text{sh} \underline{\gamma} l, \\ \underline{I}_1 &= \frac{\underline{U}_2}{\underline{Z}_C} \cdot \text{sh} \underline{\gamma} l + \underline{I}_2 \cdot \text{ch} \underline{\gamma} l. \end{aligned} \quad (8.5)$$

Во (8.5) се воведени следните величини

- константа на простирање $\underline{\gamma}$

$$\underline{\gamma} = \sqrt{\underline{z} \cdot \underline{y}} = \sqrt{(r + jx) \cdot g} = (\alpha + j\beta). \quad (8.6)$$

- карактеристична импеданција \underline{Z}_C

$$\underline{Z}_C = \sqrt{\frac{\underline{z}}{\underline{y}}} = \sqrt{\frac{r + jx}{g}}. \quad (8.7)$$

Може да се покаже дека напонот $\underline{U}(x)$ и струјата $\underline{I}(x)$ во плаштот од кабелот на растојание x од неговиот почеток ќе бидат

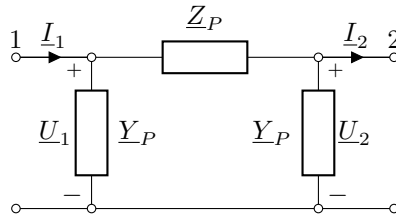
$$\begin{aligned}\underline{U}(x) &= \underline{U}_2 \cdot \text{ch}\underline{\gamma}(l-x) + \underline{Z}_C \cdot \underline{I}_2 \cdot \text{sh}\underline{\gamma}(l-x), \\ \underline{I}(x) &= \frac{\underline{U}_2}{\underline{Z}_C} \cdot \text{sh}\underline{\gamma}(l-x) + \underline{I}_2 \cdot \text{ch}\underline{\gamma}(l-x).\end{aligned}\quad (8.8)$$

Релациите (8.5) имаат ист облик како и релациите (7.6) што важеа за надземните водови со таа разлика што кај (8.5) место n , како аргумент на хиперболичните функции $\text{sh}()$ и $\text{ch}()$ фигурира аргументот l . Таа аналогија може да се искористи за едноставно изведување на одделните карактеристични величини на кабелот.

Покрај тоа, исто како и во случајот со надземните водови, кабелот со неизолиран метален плашт од сликата 8.2, посматран како елемент на ЗС на една мрежа, може да се прикаже со еден π -четворокрајник (слика 8.4). Во тој случај параметрите на тој π -четворокрајник ќе бидат

$$\underline{Z}_P = \underline{Z}_C \cdot \text{sh}\underline{\gamma}l, \quad (8.9)$$

$$\underline{Y}_P = \frac{\text{ch}\underline{\gamma}l - 1}{\underline{Z}_C \cdot \text{sh}\underline{\gamma}l}. \quad (8.10)$$



Слика 8.4. π -заменска шема на заземјувачкиот систем на кабелот од сликата 8.2

8.2.2 Влезна импеданција и пренесен (изнесен) потенцијал

Аналогно на изразот (7.20) за коефициентот на изнесување на потенцијалот ќе имаме

$$k_i = \frac{U_2}{U_1} = \frac{1}{\text{ch}(\underline{\gamma}l) + \frac{\underline{Z}_C}{\underline{Z}_2} \cdot \text{sh}(\underline{\gamma}l)}. \quad (8.11)$$

Влезната импеданција (или т.н. „импеданција на заземјување“) на кабелот, гледана од почетокот на кабелот, т.е. постројката 1 (слика 8.3),

ќе биде, аналогно на изразот (7.18)

$$\underline{Z}_{vl} = \underline{Z}_C \cdot \frac{\text{ch}(\underline{\gamma}l) + \frac{\underline{Z}_C}{\underline{Z}_2} \cdot \text{sh}(\underline{\gamma}l)}{\text{sh}(\underline{\gamma}l) + \frac{\underline{Z}_C}{\underline{Z}_2} \cdot \text{ch}(\underline{\gamma}l)}. \quad (8.12)$$

Релациите (8.11) и (8.12) се општи и важат секогаш, без оглед на карактеристиките на кабелот и неговата должина. Но сепак, тие се незгодни за практична примена бидејќи во нив се оперира со комплексни променливи што го прави решавањето на проблемите без примена на компјутери сложено и временски захтевно. Затоа и овде се воведуваат поимите „долги“ и „куси“ кабли на сосема ист начин како што тоа се правеше кај надземните водови (глава 7).

а) „Долги“ кабли

Може да се покаже [2] дека граничната должина l_d после која може да се смета дека е кабелот „долг“ се добива како решение на следната трансцедентна равенка

$$l_d = \frac{\ln \varepsilon^{-1/2}}{\text{Re}(\underline{\gamma})} = -\frac{\ln \varepsilon}{2\alpha}. \quad (8.13)$$

Во (8.13), исто како и претходно, со ε е означена големината на релативната грешка во резултатите што се прави кога пресметките се вршат со упростените формули што важат за долгите водови. Но за практични цели многу е поедноставно ако граничната должина на кабелот l_d се пресметува со следната емпириска релација, како што се предлага во Препораката ТП 7 [11]

$$l_d = 70 \cdot \sqrt{\rho}, \quad (\text{m}) \quad (8.14)$$

во која специфичната отпорност ρ се изразува во Ωm .

За долгите кабли приближно важи [2]

$$k_i \approx \frac{2 \cdot e^{-\alpha l}}{|1 + \underline{Z}_C/\underline{Z}_2|}, \quad (8.15)$$

$$\underline{Z}_{vl} \approx \underline{Z}_C. \quad (8.16)$$

Од последната релација следуваат следните, практични, односи што важат за импеданцијата на заземјување на долгите кабли.

Импеданциите на заземјување на два долги кабла со исти карактеристики (иста надолжна импеданција \underline{z} , ист надворешен

пречник d_k и иста длабочина на закопување h) ако се положени во тло со различни специфични отпорности, ќе се однесуваат како

$$\frac{Z_{vl.1}}{Z_{vl.2}} = \sqrt{\frac{\rho_1}{\rho_2}}. \quad (8.17)$$

Ако каблите имаат различни карактеристики, т.е. различна надолжна импеданција z , кога се положени во тло со исти карактеристики, нивните импеданции на заземјување ќе се однесуваат како

$$\frac{Z_{vl.1}}{Z_{vl.2}} = \sqrt{\frac{Z_{C1}}{Z_{C2}}}. \quad (8.18)$$

б) „Куси“ кабли

Граничната должина l_k за која кабелот може да се смета за “кус” , според [2] се добива како решение на следната равенка:

$$|\gamma| \cdot l_k^2 = 2 \cdot \varepsilon. \quad (8.19)$$

Слично како и за импеданцијата на заземјување кај надзмените водови, за кусите кабли приближно ќе важи [2]

$$k_i \approx \frac{1}{\left| 1 + \frac{z \cdot l}{Z_2} \right|}, \quad (8.20)$$

$$Z_{vl} \approx \frac{Z_2 + z \cdot l}{1 + \frac{z \cdot l}{Z_2}} = \frac{Z_2 + z \cdot l}{1 + Z_2/R_Z}. \quad (8.21)$$

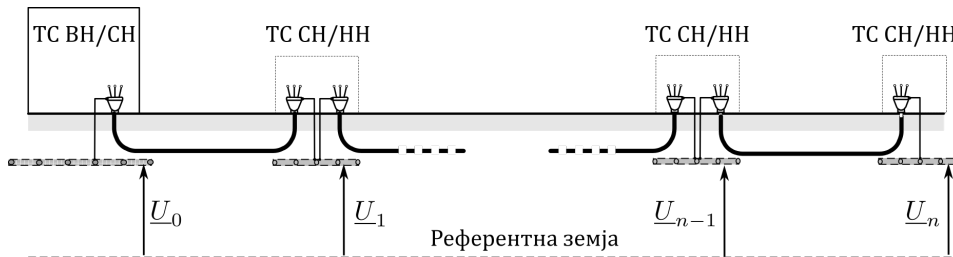
Задача 8.1. Се посматра класичен кабел од типот IPO 13 3x95 6/10 kV со должина l . Надворешниот пречник на металниот плашт од олово изнесува $d_k = 4,5$ cm. За состојба со незаситена челична арматура, кога во плаштот од кабелот тече умерена струја со вредност до 400 A, надолжната импеданција на кабелот изнесува $z = (0,7 + j2) \Omega/\text{km}$. Кога челичната арматура е заситена надолжната импеданција на кабелот изнесува $z = (0,7 + j0,7) \Omega/\text{km}$. Кабелот е закопан во тло со специфична отпорност ρ , на длабочина h . Да се пресметаат параметрите на еквивалентниот π -четворопол со кој кабелот може да се претстави во заземјувачкиот систем на мрежата. Колкава е влезната импеданција на кабелот Z_{vl} и колкав коефициентот на изнесување на потенцијалот k_i за разгледуваните две состојби со степенот на засистување на челичната арматура. Бројни вредности: $l = 500$ m; $h = 0,7$ m; $\rho = 100 \Omega\text{m}$.

□ □ □

8.3 Кабли со изолиран метален плашт

Кај каблите со изолиран метален плашт металните делови од нивната конструкција (плаштот, механичката заштита, т.е. арматурата - доколку постои, електричната заштита околу секоја жила - доколку постои) за разлика од претходно разгледуваните, класични, кабли, немаат директен спој со земјата. Затоа тие не играат улога на непосредни (директни) „заземјувачи“ како што тоа беше во претходниот случај со класичните кабли туку нивното дејство во ЗС е индиректно, на тој начин што тие галвански ги поврзуваат заземјувачите на соседните постројки и со тоа влијаат врз карактеристиките на ЗС од мрежата.

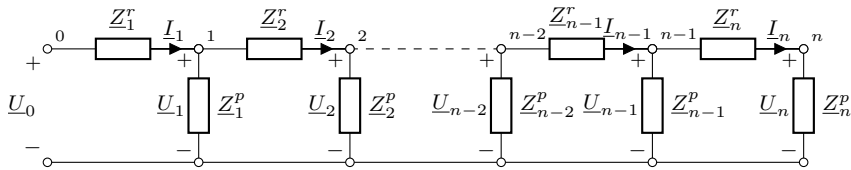
На сликата 8.5 е прикажан еден кабелски извод од кој што се напојуваат неколку трансформаторски станици среден/низок напон ТС СН/НН. Нека сите делници од изводот се изведени со кабел од ист тип којшто во својата конструкција има метален плашт или електрична заштита што се изолирани и немаат можност за контакт со тлото. Во секоја трансформаторска станица од изводот краевите од металниот плашт односно електричната заштита галвански се поврзуваат за заземјувачот на ТС, како што е тоа прикажано на сликата 8.5.



Слика 8.5. Кабелски СН извод формиран од кабли со изолиран метален плашт

Кога ќе настане земјоспој во изворната трансформаторска станица ТС ВН/СН од која што се напојува набљудуваниот извод, на заземјувачот од оваа постројка ќе се појави напон \underline{U}_0 во однос на референтната земја. Преку плаштот (и другите метални делови, ако ги има) од кабелот ќе потече струја \underline{I}_0 кон заземјувачите од соседните ТС СН/НН. На овие заземјувачи ќе се појават напони према референтната земја кои што ќе ги означиме со $\underline{U}_1, \underline{U}_2, \dots, \underline{U}_n$ кои, со оддалечување од изворната ТС ВН/СН, ќе опаѓаат по големина. Еквивалентата електрична шема што ќе се користи за пресметување на приликите во ЗС на набљудуваниот извод е прикажана на сликата 8.6.

Редните елементи \underline{Z}_j^r ($j = 1, 2, \dots, n$) во шемата од сликата 8.6 ги претставуваат импеданциите на плаштните од кабелот во поедините



Слика 8.6. Заземјувачки систем на кабелскиот извод од сликата 8.5

делници од изводот. Кога се работи за делници од изводот изработени од ист тип кабел, како што е вообичаено во практиката, тогаш за елементот \underline{Z}_j^r важи

$$\underline{Z}_j^r = \underline{z} \cdot l_j = (r + jx) \cdot l_j, \quad (8.22)$$

каде што со \underline{z} е означена импеданцијата на плаштот од кабелот по единица должина, додека со l_j е означена должината на j -тата делница од изводот.

Попречните импеданции \underline{Z}_j^p ($j = 1, 2, \dots, n$) во шемата од сликата 8.6 се еквивалентните импеданции на заземјување на заземјувачките системи на одделните ТС СН/НН.

Состојбата во ЗС на мрежата од слика 8.5 се определува со решавање на еквивалентното коло на ЗС од сликата 8.6, применувајќи некој од познатите методи за решавање на електричните кола, каков што е, на пример, методот на јазлови потенцијали. Во тој случај вообичаена е примената на компјутер кој што со помош на готов, претходно изготвен софтвер, базиран на некоја нумеричка постапка, ќе ги пресмета напоните \underline{U}_j ($j = 1, 2, \dots, n$) во јазлите од заземјувачкиот систем и струите \underline{I}_j ($j = 1, 2, \dots, n$) во металните плаштови од одделните секции на кабелскиот извод.

8.3.1 Идеализиран модел на ЗС на кабелот

Кога делниците од изводот од сликата 8.6 се со еднакви должини тогаш редните импеданции на секоја редна гранка од колото на ЗС, прикажано на сликата 8.6, ќе бидат еднакви помеѓу себе, т.е.

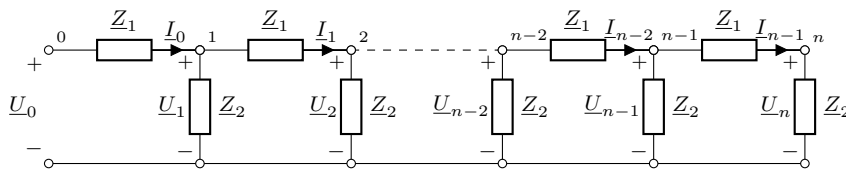
$$\underline{Z}_1^r = \underline{Z}_2^r = \dots = \underline{Z}_n^r = \underline{Z}_1.$$

Ако истовремено и заземјувачите на попатните ТС СН/НН од изводот се со исти карактеристики и имаат иста отпорност на распростирање:

$$\underline{Z}_1^p = \underline{Z}_2^p = \dots = \underline{Z}_n^p = \underline{Z}_2,$$

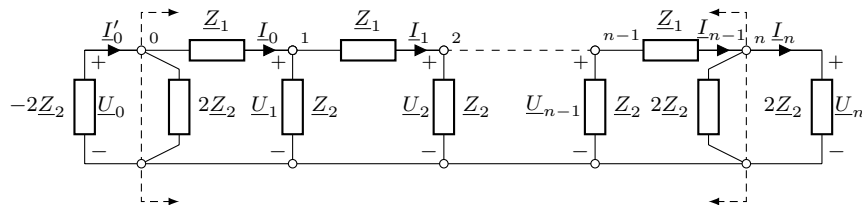
тогаш колото од сликата 8.6 може да се реши и аналитички, во затворена форма.

Да посматраме сега еден кабелски извод (фидер) составен од n идентични секции, изведен од кабли со изолиран метален плашт. Кабелскиот извод се напојува од ТС ВН/СН, означена со индексот 0, и на него се приклучени n потрошувачки ТС СН/НН, означени со индексите од 1 до n . Заземјувачкиот систем од набљудуваниот фидер ќе го претставиме идеализирано, сметајќи дека секоја негова секција има иста должина l и иста импеданција на плаштот $Z_1 = z \cdot l$ и дека секоја ТС СН/НН има иста импеданција на заземјувачот Z_2 (слика 8.7).



Слика 8.7. Еквивалентна шема на заземјувачкиот систем ЗС

Но за да можеме да го користиме истиот модел од точката 4.1, кој што се однесуваше на каскада од n идентични симетрични четворополи, во јазелот 0 од шемата на сликата 8.7 ќе додадеме уште две напречни гранки со импеданции $-2Z_2$ и $+2Z_2$ додека импеданцијата Z_2 , напречно приклучена во јазелот n , ќе ја претставиме како паралелна врска од две еднакви импеданции $+2Z_2$ и $+2Z_2$, како што е тоа прикажано на сликата 8.8. Со тоа вредностите на напоните на јазлите и струите во редните гранки од колото воопшто нема да се изменат, но делот од колото на заземјувачкиот систем, ограничен помеѓу испрекинатите линии, ќе се претвори во каскада од n идентични, симетрични π -образни четворополи со параметри $(2Z_2, Z_1, 2Z_2)$. Сега веќе на тој дел од колото можеме да го примениме споменатиот модел од точката 4.1.



Слика 8.8. Еквивалентна шема на заземјувачкиот систем ЗС

Сега како и во случајот на надземен вод од точката 4.1, за заземјувачкиот систем од слика 8.8 можеме да ги напишеме релациите со кои се дефинираат односите помеѓу приликите на почетокот $(\underline{U}_0, \underline{I}'_0)$ и крајот $(\underline{U}_n, \underline{I}_n)$ од каскадата четворополи

$$\begin{aligned} \underline{U}_0 &= \underline{U}_n \cdot \text{ch}(n\underline{g}) + \underline{Z} \cdot \underline{I}_n \cdot \text{sh}(n\underline{g}), \\ \underline{I}'_0 &= \frac{\underline{U}_n}{\underline{Z}} \cdot \text{sh}(n\underline{g}) + \underline{I}_n \cdot \text{ch}(n\underline{g}). \end{aligned} \quad (8.23)$$

Параметрите \underline{g} и \underline{Z} на изводот кои фигурираат во системот равенки (8.23) се пресметуваат со помош на следните изрази кои се изведени во [2]

$$\underline{g} = \ln \left(1 + \frac{\underline{Z}_1}{2\underline{Z}_2} + \sqrt{2 \cdot \frac{\underline{Z}_1}{2\underline{Z}_2} + \frac{\underline{Z}_1^2}{4\underline{Z}_2^2}} \right), \quad (8.24)$$

$$\underline{Z} = \frac{\sqrt{\frac{\underline{Z}_1 \cdot 2\underline{Z}_2}{2 + \frac{\underline{Z}_1}{2\underline{Z}_2}}}}{\sqrt{2 \cdot \frac{\underline{Z}_1}{2\underline{Z}_2} + \frac{\underline{Z}_1^2}{4\underline{Z}_2^2}}} = \frac{\underline{Z}_1}{\sqrt{2 \cdot \frac{\underline{Z}_1}{2\underline{Z}_2} + \frac{\underline{Z}_1^2}{4\underline{Z}_2^2}}}. \quad (8.25)$$

Значи при грешка во изворната ТС ВН/СН, на нејзиниот заземјувач ќе се појави напон \underline{U}_0 , а преку плаштот на кабелот ќе потече струја \underline{I}'_0 кон заземјувачите на ТС СН/НН. Напоните кои што ќе се појават на заземјувачите на ТС ќе опаѓаат постепено по должината на изводот. Бидејќи во конкретниот случај е

$$\underline{I}_n = \frac{\underline{U}_n}{2\underline{Z}_2}, \quad (8.26)$$

со замена во првата равенка од (8.23), се добива

$$\underline{U}_0 = \underline{U}_n \left[\text{ch}(n\underline{g}) + \frac{\underline{Z}}{2\underline{Z}_2} \cdot \text{sh}(n\underline{g}) \right], \quad (8.27)$$

од каде што лесно се пресметува напонот \underline{U}_n во крајната точка од изводот, а потоа, со помош на (8.26) и фиктивната струја \underline{I}_n

$$\underline{U}_n = \frac{\underline{U}_0}{\text{ch}(n\underline{g}) + \frac{\underline{Z}}{2\underline{Z}_2} \cdot \text{sh}(n\underline{g})}. \quad (8.28)$$

Напоните во преостанатите јазли од колото на заземјувачкиот систем од сликата 8.7 односно 8.8 се добиваат со помош на равенката (8.29), која што произлегува од првата равенка од (8.23) и равенката (8.26)

$$\underline{U}_k = \underline{U}_n \left[\text{ch}(n-k)\underline{g} + \frac{\underline{Z}}{2\underline{Z}_2} \text{sh}(n-k)\underline{g} \right], \quad k = 1, 2, \dots, n. \quad (8.29)$$

Според тоа, за коефициентот на изнесен потенцијал во k -тата ТС СН/НН се добива

$$u(k) = \frac{|U_k|}{|U_0|} = \frac{\left| \text{ch}(n-k)g + \frac{Z}{2Z_2} \text{sh}(n-k)g \right|}{\left| \text{ch}(ng) + \frac{Z}{2Z_2} \cdot \text{sh}(ng) \right|}. \quad (8.30)$$

Сега може да се пресмета и струјата I_0 во првата делница (слика 8.7) што се изнесува од заземјувачкиот систем

$$I_0 = \frac{U_0 - U_1}{Z_1}, \quad (8.31)$$

а потоа и влезната импеданција Z_{vl} на самиот извод

$$Z_{vl} = \frac{U_0}{I_0}. \quad (8.32)$$

Лесно може да се покаже дека влезната импеданција на целиот извод може да се пресмета и директно, со помош на следната формула

$$Y_{vl} = \frac{1}{Z_1} \cdot \frac{\text{sh}(ng) + \frac{Z}{2Z_2} \cdot \text{ch}(ng)}{\text{ch}(ng) + \frac{Z}{2Z_2} \cdot \text{sh}(ng)} - \frac{1}{2Z_2}; \quad Z_{vl} = \frac{1}{Y_{vl}}. \quad (8.33)$$

8.3.2 Егзактен модел со уважување на индуктивните спреги

Во последно време кабелските мрежи за среден и висок напон ($U_n \geq 10 \text{ kV}$) се изведуваат со помош на едножилни кабли со изолација на база на синтетичка материја (полиетилен РЕ, вмрежен полиетилен XLPE, гума и др.) бидејќи таквите кабли имаат низа предности во однос на трижилните. Тие, по правило, се изведуваат како „заштитени“ (се нарекуваат уште и Н-кабли, а ознаката Н доаѓа од името на пронаоѓачот на оваа техника, германскиот инженер Хохштетер (Hochstädter)) бидејќи кај нив се врши регулација (или присилна радијализација) на електричното поле. Регулацијата се врши на тој начин што под и над изолацијата од жилата се поставуваат два слоја од метализирана хартија или нешто слично, во форма на два коаксијални метални цилиндри. Надворешната електрода од така формираните коаксијален кондензатор е т.н. „електрична заштита“ која, пак, обично се состои од бакарни жици густо намотани хеликоидално над изолацијата на жилата. Над слојот бакарни жици се мота, повторно

хеликоидално, но во спротивна насока, бакарна лента со определена дебелина која има задача да изврши „електрично премостување“ на бакарните жици. Вкупниот пресек на електричната заштита на жилата изнесува 16 mm^2 или повеќе. Електричната заштита на жилата, по правило, се заземјува на двата свои краја, т.е. се поврзува галвански со заземјувањето на постројките во кои што е приклучен кабелот. На тој начин електричната заштита, која што претставува метален спроводен елемент во неговата конструкција, и покрај тоа што е изолирана од тлото, претставува елемент на ЗС бидејќи врши галванско поврзување на неговите елементи – заземјувачите на постројките во мрежата.

Постојат и кабли кои немаат електрична заштита но кои имаат метален плашт, изолиран во однос на земјата. Тие, гледано од аспект на заземјувањето, се владеат на наполно ист начин како и претходно споменатите кабли со електрична заштита. Од сега па натаму во текстот, заради упростување во именувањето на видот на каблите, и едните и другите кабли ќе ги нарекуваме кабли со изолиран метален плашт.

Во практиката трифазниот кабелски вод се изведува со поставување на три едножилни кабли (обично од типот ХНР, РНР, ХРЕ), во ист ров. Каблите се поставуваат во рамнина (слика 8.12б), на определено меѓусебно растојание $a = 5 \div 10 \text{ cm}$, или пак, компактирано, во форма на триаголник при што каблите меѓусебно се допираат (слика 8.12а).

Во случајот на кабелски вод изведен со три едножилни кабли помеѓу фазните спроводници и плаштовите постојат индуктивни спреги кои треба да бидат земени предвид за моделот да биде што е можно пореален.

За таа цел нека посматраме ситуација кога низ фазните спроводници на гореспоменатиот систем течат три фазни струи $\underline{I}_A, \underline{I}_B, \underline{I}_C$. Специјален случај е режимот на земјоспој, кога струја тече само во една фаза (струјата на земјоспојот \underline{I}_{k1}). Тогаш ќе биде $\underline{I}_A = \underline{I}_{k1}, \underline{I}_B = \underline{I}_C = 0$, а во плаштовите од жилите протекуваат струи $\underline{I}_1, \underline{I}_2, \underline{I}_3$ (слика 8.9). Постојењето на заемните индуктивни спреги помеѓу фазните спроводници и бакарните плаштови може да се земе предвид преку воведување на индуцирани електромоторни сили $\underline{E}_1, \underline{E}_2, \underline{E}_3$ во секој од плаштовите (слика 8.10).

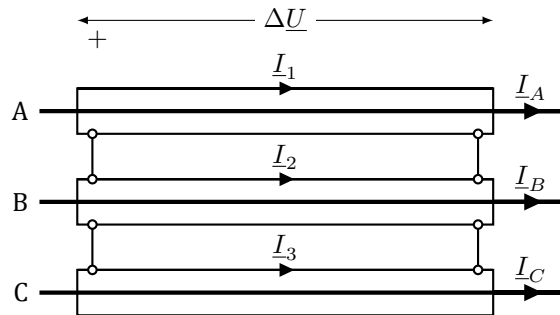
За колото од сликата 8.10 важи

$$\Delta \underline{U} = \underline{U}_p - \underline{U}_q = \underline{E} + \underline{Z} \cdot \underline{I}. \quad (8.34)$$

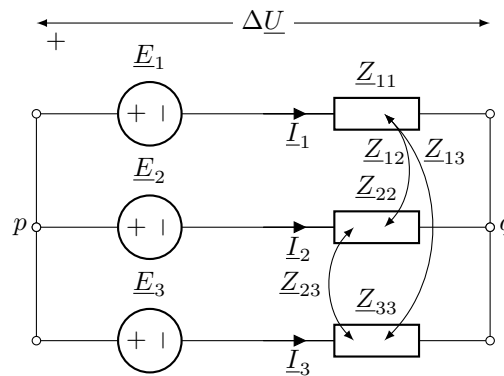
Во релацијата (8.34) ознаките на одделните величини го имаат следното значење

\underline{E} вектор 3×1 на индуцираните ЕМС во плаштовите;

\underline{I} вектор 3×1 на струите што протекуваат низ плаштовите;



Слика 8.9. Трифазен кабелски вод составен од три едножилни кабли



Слика 8.10. Модел со којшто се врши распрегнување на магнетските спреги

ΔU вектор 3×1 на падовите на напон меѓу почетокот и крајот;
 \underline{Z} матрица 3×3 на сопствени и меѓусебни импеданции на плаштовите. Елементите со еднакви индекси \underline{Z}_{ii} се сопствените импеданции на плаштовите, додека елементите \underline{Z}_{ij} се меѓусебните импеданции меѓу плаштовите на каблите кои што се одредуваат со следната релација

$$\underline{Z}_{ij} = 0,05 \cdot l + j \cdot 0,1445 \cdot \log \frac{D_{ek}}{d_{ij}} \cdot l; \quad i, j = 1, 2, 3; \quad j \neq i, \quad (8.35)$$

каде што D_{ek} е еквивалентното растојание до повратниот пат на струјата во земјата, пресметано според (7.4), додека со d_{ij} е означено растојанието помеѓу оските на металните екрани на жилите i и j .

Дијагоналните елементи \underline{Z}_{ii} од матрицата \underline{Z} се всушност сопствените импеданции самите екрани на жилите од кабелот, т.е. \underline{Z}_{ii} претставува сопствената импеданција екранот од жилата i . Таа се

пресметува со помош на релацијата (8.36) која што е слична на (8.35) со таа разлика што во неа се појавува и сопствената активна отпорност на самиот екран $R_e = r_e \cdot l = (\rho_e/S_e) \cdot l$, додека за растојанието d_{ij} се зема дека тоа е еднакво на средниот радиус на плаштот од i -тата жила, т.е. $d_{ij} \approx d_e/2$.

$$\underline{Z}_{ii} = 0,05 \cdot l + r_e \cdot l + j \cdot 0,1445 \cdot \log \frac{D_{ek}}{d_e/2} \cdot l; \quad i = 1, 2, 3. \quad (8.36)$$

Елементите од матрицата на индуцираните електромоторни \underline{E} во одделните екрани зависат од струите $(\underline{I}_A, \underline{I}_B, \underline{I}_C)$ во фазните спроводници, кои што се причина за нивното постоење, но зависат и од меѓусебните импеданции \underline{M}_{ij} ($\underline{M}_{ji} = \underline{M}_{ij}$) помеѓу фазните спроводници ($i = A, B, C$) и металните екрани на кабелските жили ($j = 1, 2, 3$). Тие ќе бидат

$$\underline{E}_i = \underline{M}_{iA} \cdot \underline{I}_A + \underline{M}_{iB} \cdot \underline{I}_B + \underline{M}_{iC} \cdot \underline{I}_C; \quad i = 1, 2, 3. \quad (8.37)$$

Меѓусебните импеданции $\underline{M}_{ij} = \underline{M}_{ji}$; $i = 1, 2, 3$; $j = A, B, C$ се всушност меѓусебните импеданции помеѓу фазниот спроводник од фазата i и екранот на жилата j . Тие пресметуваат, исто така, со помош на релацијата (8.35). Во неа со $d_{ij} = d_{ji}$ е означено растојанието помеѓу оските на фазниот спроводник i и екранот j , додека за случајот $i = j$, за меѓусебното растојание помеѓу фазниот спроводник i и екранот од истата жила i се зема

$$d_{ii} = d_e/2; \quad i = 1, 2, 3. \quad (8.38)$$

Доколку се познати вредностите на падот на напон $\Delta \underline{U}$ лесно, преку релацијата (8.34), се определуваат струите \underline{I} низ плаштовите од кабелот

$$\underline{I} = \underline{Z}^{-1} \cdot (\Delta \underline{U} - \underline{E}). \quad (8.39)$$

Колото од сликата 8.10 според Тевененовата теорема може да се еквивалентира со еден напонски генератор чија импеданција се одредува со решавање на истото коло при $\underline{E} = 0$, додека напонот на еквивалентниот генератор е еднаков на напонот на празен од, т.е. тој е еднаков на напонот $\Delta \underline{U}$.

Претпоставувајќи дека на јазлите p и q сме поставиле напонски генератор со напон $\Delta \underline{U}$, при $\underline{E} = 0$, еквивалентната импеданција можеме да ја добиеме на следниот начин

$$\underline{Z}_e = \frac{\Delta \underline{U}}{\sum_{i=1}^3 \underline{I}_i}. \quad (8.40)$$

Заменувајќи $\underline{E} = 0$ во (8.34) и водејќи сметка дека е

$$\Delta \underline{U} = \Delta \underline{U} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}^T,$$

за струите во плаштовите можеме да напишеме

$$\underline{I} = \Delta \underline{U} \cdot \underline{Z}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}^T. \quad (8.41)$$

Ако ја воведеме матрицата $\underline{Y} = \underline{Z}^{-1}$ за векторот на струите добиваме

$$\underline{I} = \Delta \underline{U} \cdot \begin{bmatrix} \sum_{j=1}^3 \underline{Y}_{1j} & \sum_{j=1}^3 \underline{Y}_{2j} & \sum_{j=1}^3 \underline{Y}_{3j} \end{bmatrix}^T, \quad (8.42)$$

а потоа со замена во 8.40 добиваме

$$\underline{Z}_e = \frac{1}{\sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 \underline{Y}_{ij}}. \quad (8.43)$$

Векторот со напоните на напонските генератори \underline{E} од сликата 8.10 може да се трансформира во вектор на струи на струјни генератори на следниот начин

$$\underline{J} = \underline{Y} \cdot \underline{E}, \quad (8.44)$$

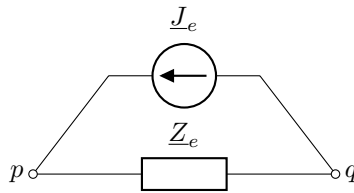
со што добиваме 3 паралелно поврзани струјни генератори чии струи се

$$\underline{J}_i = \sum_{j=1}^3 \underline{Y}_{ij} \cdot \underline{E}_j, \quad i = 1, 2, 3. \quad (8.45)$$

Овие струјни генератори може да се еквивалентираат со еден ступен генератор чија струја изнесува

$$\underline{J}_e = \sum_{i=1}^3 \underline{J}_i = \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 \underline{Y}_{ij} \cdot \underline{E}_j. \quad (8.46)$$

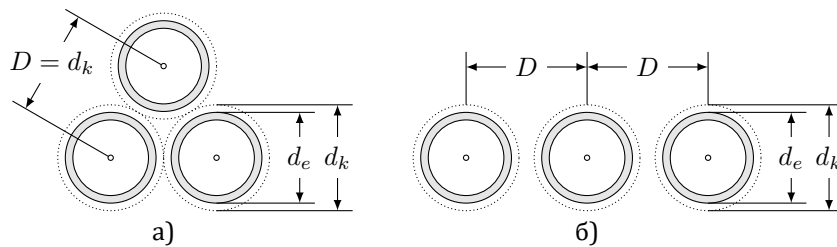
Со претходно опишаната постапка колото од сликата 8.10 може да се еквивалентира со еднофазен еквивалент поврзан помеѓу јазлите p и q како што тоа е прикажано на сликата 8.11.



Слика 8.11. Еднофазен еквивалент за колото од сликата 8.10

8.3.3 Аналитички изрази за пресметка на еквивалентите параметри на каблите во некои карактеристични случаи. Редукционен фактор

Жилите кај трифазните кабелски водови, составени од три едножилни кабли, се поставуваат формацијата „триаголник“ (слика 8.12а) или, пак, во формацијата „рамнина“ (слика 8.12б). Во наредниот дел ќе биде прикажан модел за пресметување на бараните параметри \underline{Z}_e и \underline{J}_e од еднофазниот еквивалент на колото на заземјувачкиот систем на кабелот.



Слика 8.12. Разни начини на поставување на жилите во кабелскиот сноп

а) Распоред на жилите во триаголник

Кога жилите од кабелот се поставени во триаголен распоред, како на сликата 8.12а, тогаш, во согласност со (8.35) и (8.36), важат следните релации

$$\underline{Z} = \begin{bmatrix} \underline{Z}_s & \underline{Z}_m & \underline{Z}_m \\ \underline{Z}_m & \underline{Z}_s & \underline{Z}_m \\ \underline{Z}_m & \underline{Z}_m & \underline{Z}_s \end{bmatrix}, \quad (8.47)$$

$$\begin{aligned} \underline{Z}_s &= \left(0,05 + r_e + j \cdot 0,1445 \cdot \log \frac{D_{ek}}{d_e/2} \right) \cdot l, \\ \underline{Z}_m &= \left(0,05 + j \cdot 0,1445 \cdot \log \frac{D_{ek}}{D} \right) \cdot l. \end{aligned} \quad (8.48)$$

каде што $r_e = \rho_e / S_e$ е надолжната отпорност на металниот екран од една жила.

Во овие релации со \underline{Z}_s е означена сопствената импеданција на секоја од жилите додека со \underline{Z}_m е означена меѓусебната импеданција помеѓу секои две соседни жили кои се, од причини на симетрија, меѓусебно еднакви.

Меѓусебните импеданции помеѓу фазниот спроводник од фазата $f = A, B, C$ и екраните на трите жили од кабелскиот вод се пресметуваат со помош на (8.35). За случајот $f = A$, тие ќе бидат

$$\begin{aligned} \underline{M}_{1A} &= 0,05 \cdot l + j \cdot 0,1445 \cdot \log \frac{D_{ek}}{d_e/2} \cdot l \equiv \underline{M}_s, \\ \underline{M}_{2A} &= \underline{M}_{3A} = 0,05 \cdot l + j \cdot 0,1445 \cdot \log \frac{D_{ek}}{D} \cdot l \equiv \underline{M}_m. \end{aligned} \quad (8.49)$$

Слично, со помош на (8.35), се пресметуваат и преостанатите сопствени и меѓусебни импеданции $\underline{M}_{ij} = \underline{M}_{ji}$ помеѓу фазните спроводници од преостанатите фази ($i = B, C$) и трите кабелски екрани ($j = 1, 2, 3$).

Нека посматраме режим на земјоспој (или еднофазна куса врска) настанат на фазата A , Во тој случај во фазата A тече струјата на грешка $\underline{I}_A = \underline{I}_{KV}$, додека во другите две фази од кабелскиот вод струите се еднакви на нула, т.е. $\underline{I}_B = \underline{I}_C = 0$. Тогаш, во согласност со (8.37), за индуцираните е. м. сили во металните плаштови, ќе добиеме

$$\underline{E}_i = \underline{M}_{iA} \cdot \underline{I}_A + \underline{Z}_{iB} \cdot \underline{I}_B + \underline{Z}_{iC} \cdot \underline{I}_C = \underline{M}_{ia} \cdot \underline{I}_{KV}, \quad i = 1, 2, 3.$$

Според тоа матрицата на индуцираните е.м. сили \underline{E} ќе биде

$$\underline{E} = \underline{I}_{KV} \cdot \left[\begin{array}{ccc} \underline{M}_s & \underline{M}_m & \underline{M}_m \end{array} \right]^T. \quad (8.50)$$

Во тој случај, со примена на моделот опишан во претходната точка 8.3.2, лесно се покажува дека за набљудуваниот случај на формација триаголник на жилите важат следните релации

$$\underline{Z}_e = \frac{\underline{Z}_s + 2 \cdot \underline{Z}_m}{3}, \quad (8.51)$$

$$\underline{J}_e = \frac{\underline{M}_s + 2 \cdot \underline{M}_m}{\underline{Z}_s + 2 \cdot \underline{Z}_m} \cdot \underline{I}_{KV}, \quad (8.52)$$

$$\underline{E}_e = \underline{Z}_e \cdot \underline{J}_e = \frac{\underline{M}_s + 2 \cdot \underline{M}_m}{3} \cdot \underline{I}_{KV}. \quad (8.53)$$

Редукциониот фактор на кабелот, слично како и кај надземните водови (релација 7.38), се дефинира како однос помеѓу преостаната

струја ($\underline{I}_{KV} - \underline{J}_e$), која што продолжува кон крајот на кабелот и струјата на грешка \underline{I}_{KV} . Тој всушност претставува мерка за тоа колкав дел од струјата на грешка ќе се инјектира во заземјувачот на крајот од кабелот при доземен спој на неговиот крај

$$\underline{r}_f = \frac{\underline{I}_{KV} - \underline{J}_e}{\underline{I}_{KV}} = 1 - \frac{\underline{J}_e}{\underline{I}_{KV}} = 1 - \frac{\underline{M}_s + 2 \cdot \underline{M}_m}{\underline{Z}_s + 2 \cdot \underline{Z}_m}. \quad (8.54)$$

б) Распоред на жилите во рамнина

Може да се покаже дека кога жилите од кабелот се поставени во рамнина, како на сликата 8.12б, тогаш, во согласност со (8.35) и (8.36), за елементите на матрицата \underline{Z} важат следните релации

$$\underline{Z} = \begin{bmatrix} \underline{Z}_s & \underline{Z}_{m1} & \underline{Z}_{m2} \\ \underline{Z}_{m1} & \underline{Z}_s & \underline{Z}_{m1} \\ \underline{Z}_{m2} & \underline{Z}_{m1} & \underline{Z}_s \end{bmatrix}, \quad (8.55)$$

каде што сопствените и меѓусебните импеданции \underline{Z}_s , \underline{Z}_{m1} и \underline{Z}_{m2} , во согласност со (8.35) и (8.36), се пресметуваат со помош на следните изрази

$$\begin{aligned} \underline{Z}_s &= \left(0,05 + r_e + 0,1445 \cdot \log \frac{D_{ek}}{d_e/2} \right) \cdot l, \\ \underline{Z}_{m1} &= \left(0,05 + 0,1445 \cdot \log \frac{D_{ek}}{D} \right) \cdot l, \\ \underline{Z}_{m2} &= \left(0,05 + 0,1445 \cdot \log \frac{D_{ek}}{2D} \right) \cdot l. \end{aligned}$$

Елементите \underline{M}_{ij} од матрицата \underline{M} на меѓусебните импеданции помеѓу фазните спроводници и екраните на трите жили од кабелскиот вод, слично како и во претходниот случај, важат следните релации

$$\underline{M} = \begin{bmatrix} \underline{M}_s & \underline{M}_{m1} & \underline{M}_{m2} \\ \underline{M}_{m1} & \underline{M}_s & \underline{M}_{m1} \\ \underline{M}_{m2} & \underline{M}_{m1} & \underline{M}_s \end{bmatrix},$$

каде што е

$$\begin{aligned} \underline{M}_s &= 0,05 \cdot l + j \cdot 0,1445 \cdot \log \frac{D_{ek}}{d_e/2} \cdot l, \\ \underline{M}_{m1} &= 0,05 \cdot l + j \cdot 0,1445 \cdot \log \frac{D_{ek}}{D} \cdot l, \\ \underline{M}_{m2} &= 0,05 \cdot l + j \cdot 0,1445 \cdot \log \frac{D_{ek}}{2D} \cdot l. \end{aligned} \quad (8.56)$$

Конечното решение за параметрите \underline{Z}_e и \underline{J}_e гласи

$$\underline{Z}_e = \underline{Z}_s - \frac{2 \cdot (\underline{Z}_s - \underline{Z}_{m1})^2}{3\underline{Z}_s - 4\underline{Z}_{m1} + \underline{Z}_{m2}}, \quad (8.57)$$

$$\underline{J}_e = \underline{I}_{KV} \cdot \frac{\underline{Z}_{m2} \cdot \underline{M}_1 + \underline{Z}_s \cdot (\underline{M}_s + \underline{M}_{m1} + \underline{M}_{m2})}{\underline{Z}_s^2 - 2\underline{Z}_{m1}^2 + \underline{Z}_s \cdot \underline{Z}_{m2}} - \underline{I}_{KV} \cdot \underline{Z}_{m1} \cdot \frac{(\underline{M}_s + 2\underline{M}_{m1} + \underline{M}_{m2})}{\underline{Z}_s^2 - 2\underline{Z}_{m1}^2 + \underline{Z}_s \cdot \underline{Z}_{m2}}, \quad (8.58)$$

$$\underline{r}_f = 1 - \frac{\underline{J}_e}{\underline{I}_{KV}} = 1 - \frac{\underline{Z}_{m2} \cdot \underline{M}_1 + \underline{Z}_s \cdot (\underline{M}_s + \underline{M}_{m1} + \underline{M}_{m2})}{\underline{Z}_s^2 - 2\underline{Z}_{m1}^2 + \underline{Z}_s \cdot \underline{Z}_{m2}} + \underline{Z}_{m1} \cdot \frac{(\underline{M}_s + 2\underline{M}_{m1} + \underline{M}_{m2})}{\underline{Z}_s^2 - 2\underline{Z}_{m1}^2 + \underline{Z}_s \cdot \underline{Z}_{m2}}. \quad (8.59)$$

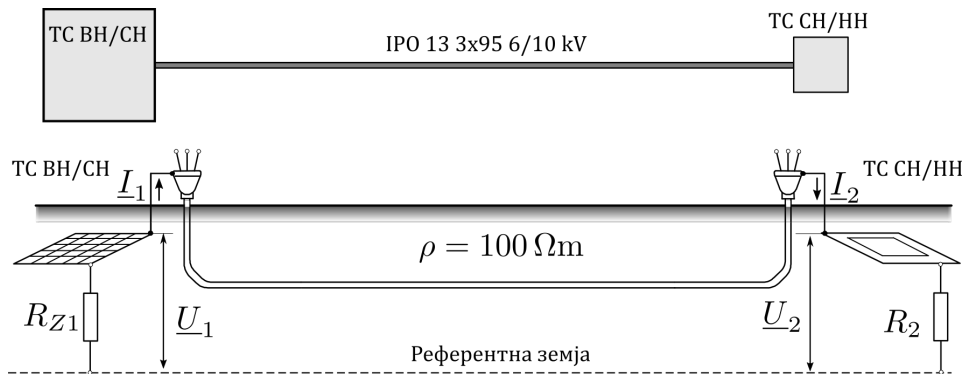
8.4 Примери и задачи

Пример 8.1. Еден 10 kV кабел од типот IPO 13 3×95 6/10 kV и со должина $l = 0,75$ km е положен во земја со специфична отпорност $\rho = 100 \Omega\text{m}$ на длабочина $h = 0,7$ m. Надворешниот пречник на кабелот изнесува $d_k = 4,5$ cm. На крајот од кабелот е приклучена трансформаторска станица СН/НН чија еквивалентна импеданција на заштитното заземјување изнесува $\underline{Z}_2 = R_2 = 5 \Omega$. Импеданција по единица должина на металниот плашт заедно со челичната арматура е $\underline{z} = (0,7 + j2) \Omega/\text{km}$. Потребно е да се пресмета

- еквивалентната (влезната) импеданција на кабелот \underline{Z}_{vl} ;
- граничната должина l_d после која кабелот може да се третира како бесконечно долг;
- коефициентот на изнесување на потенцијалот \underline{k}_i во напојуваната ТС СН/НН;
- параметрите \underline{Z}_P и \underline{Y}_P на π -заменската шема на кабелот, посматран како елемент на заземјувачкиот систем.

Решение

Каблите од типот IPO 13, каков што е разгледуваниот, спаѓаат во групата кабли со неизолиран метален плашт. Тоа значи дека покрај тоа што кабелот со својот метален плашт и арматура ќе ја спроведува струјата на грешката во аксијална насока (од ТС ВН/СН кон ТС СН/НН), ќе постои и струја на одведување во земјата, т.е. самиот плашт на кабелот ќе ја игра и улогата на заземјувач.



Слика П.8.1.1. Кабел со неизолиран метален плашт поставен во земјата

За да ги пресметаме бараните вредности во задачата, најнапред ќе ја пресметаме отпорноста на распространување на плаштот од кабелот, третиран како елементарен заземјувач во форма на хоризонтална електрода. Во согласност со релациите (8.1)–(8.4) ќе имаме

$$R_Z = \frac{\rho}{\pi \cdot l} \cdot \ln \frac{l}{\sqrt{h \cdot d_k}} = \frac{100}{\pi \cdot 750} \cdot \ln \frac{750}{\sqrt{0,7 \cdot 0,045}} = 0,354 \Omega;$$

$$Y_Z = \frac{1}{R_Z} = 2,822 \text{ S};$$

$$\underline{y} = g = \frac{Y_Z}{l} = \frac{2,822}{0,75} = 3,763 \frac{\text{S}}{\text{km}}.$$

Сега, со помош на изразите (8.6) и (8.7) можеме да ги пресметаме параметрите \underline{Z}_C и $\underline{\gamma}$ на кабелот

$$\underline{\gamma} = \sqrt{\underline{z} \cdot \underline{y}} = \sqrt{(0,7 + j2) \cdot 3,763} = (2,303 + j1,634) \text{ km}^{-1};$$

$$\underline{Z}_C = \sqrt{\frac{\underline{z}}{\underline{y}}} = \sqrt{\frac{0,7 + j2}{3,763}} = (0,612 + j0,434) \Omega = 0,75 \cdot e^{j35,4^\circ} \Omega.$$

а) Пресметка на влезната импеданција на кабелот \underline{Z}_{vl}

Врз основа на релацијата (8.12) можеме да пишуваме

$$\underline{Z}_{vl} = \underline{Z}_C \cdot \frac{\text{ch}(\underline{\gamma}l) + \frac{\underline{Z}_C}{Z_2} \cdot \text{sh}(\underline{\gamma}l)}{\text{sh}(\underline{\gamma}l) + \frac{\underline{Z}_C}{Z_2} \cdot \text{ch}(\underline{\gamma}l)} = (0,596 + j0,401) \Omega = 0,719 \cdot e^{j34^\circ} \Omega.$$

б) Пресметка на граничната должина l_d на кабелот

Граничната должина l_d после која, со релативна точност $\varepsilon = 0,05$ кабелот ќе можеме да го третираме како „долг“ т.е. бесконечно долг, се пресметува со помош на релацијата (8.13)

$$l_d = -\frac{\ln \varepsilon}{2\alpha} = -\frac{\ln 0,05}{2 \cdot 2,303} = 0,65 \text{ km.}$$

в) Пресметка на коефициентот на изнесување на потенцијалот k_i

Точната вредност на коефициентот k_i ќе ја пресметаме со помош на релацијата (8.11):

$$k_i = \frac{1}{\text{ch}(\underline{\gamma}l) + \frac{\underline{Z}_C}{\underline{Z}_2} \cdot \text{sh}(\underline{\gamma}l)} = (0,089 - j0,31) = 0,323 \cdot e^{-j73,9^\circ}.$$

Со оглед на тоа дека водот е „долг“ ($l = 0,75 \text{ km} > 0,65 \text{ km}$) коефициентот k_i можеме да го пресметаме и на поедноставен начин со помош на релацијата (8.15), а приближната вредност на влезната импеданција на кабелот можеме да ја пресметаме со помош на (8.16)

$$k_i \approx \frac{2 \cdot e^{-\alpha l}}{|1 + \underline{Z}_C/\underline{Z}_2|} = \frac{2 \cdot e^{-2,303 \cdot 0,75}}{1,12576} = \frac{0,3556}{1,12576} = 0,316,$$

$$\underline{Z}_{vl} \approx \underline{Z}_C = (0,612 + j0,434) \Omega = 0,75 \cdot e^{j35,4^\circ} \Omega.$$

Гледаме дека последната вредност за \underline{Z}_{vl} , пресметана приближно, се разликува само за 3% во однос на точната вредност за добиена со егзактната релација (8.12).

г) Пресметка на параметрите \underline{Z}_P и \underline{Y}_P на π -заменската шема на кабелот

Параметрите \underline{Z}_P и \underline{Y}_P на π -заменската шема на кабелот ќе ја пресметаме со помош на релациите (8.9) и (8.10)

$$\underline{Z}_P = \underline{Z}_C \cdot \text{sh} \underline{\gamma}l = (-0,6211 + j2,0713) = 2,162 \cdot e^{j106,7^\circ} \Omega,$$

$$\underline{Y}_P = \frac{\text{ch} \underline{\gamma}l - 1}{\underline{Z}_C \cdot \text{sh} \underline{\gamma}l} = 1,185 \cdot e^{-j16,3^\circ} \text{ S}.$$

Претходните пресметки можеме да ги направиме во Matlab со следната функција.

Програма 8.1. Пресметка на параметрите на кабел со неизолиран метален плашт (programi/kabli/neizolian_param.m)

```

1 function [Zvl,k,Zp,Yp] = neizolian_param(rho,l,h,dk,z,Z2)
2 Rz = rho/(pi*l*1000)*log(l*1000/sqrt(h*dk));
3 g = 1/(Rz*l);
4 gama = sqrt(z*g);
5 Zc = sqrt(z/g);
6 Zvl = Zc*(cosh(gama*l) + Zc/Z2*sinh(gama*l)) ...
7     /(sinh(gama*l) + Zc/Z2*cosh(gama*l));
8 k = 1/(cosh(gama*l) + Zc/Z2*sinh(gama*l));
9 Zp = Zc*sinh(gama*l);
10 Yp = (cosh(gama*l)-1)/Zp;
    
```

Во неа влезни променливи се $\rho(\Omega\text{m})$, $l(\text{km})$, $h(\text{m})$, $d_k(\text{m})$, $z(\Omega/\text{km})$ и $Z_2(\Omega)$. Како излез од функцијата се добиваат $Z_{vl}(\Omega)$, k , $Z_P(\Omega)$ и $Y_P(S)$.

За бројните вредности дадени во примерот бараните параметри на кабелот ги пресметуваме на следниот начин

```

>> [Zvl,k,Zp,Yp] = neizolian_param(100,0.75,0.7,0.045,0.7+2j,5)
Zvl = 0.5962 + 0.4015i
k = 0.0894 - 0.3101i
Zp = -0.6211 + 2.0713i
Yp = 1.1376 - 0.3326i
    
```



Пример 8.2. Да се пресмета вредноста на влезната импеданција Z_{vl} на кабелот од претходниот пример (8.1) за случајот кога неговата челична арматура е во заситена состојба така што неговата надолжна импеданција изнесува $z = (0, 7 + j0, 7) \Omega/\text{km}$. Колкав ќе биде коефициентот на изнесениот потенцијал k_i во овој случај.

Решение

Експериментите со каблите од типот IPO 13 кои во својата конструкција содржат челична арматура изработена од две челични ленти покажуваат дека кога струјата во плаштот на кабелот надминува 400 А, поради јакото магнетско поле што таа го создава во челичната арматура, доаѓа до нејзино заситување така што, надворено гледано, надолжната импеданција на кабелот се намалува од вредноста $z = (0, 7 + j2) \Omega/\text{km}$ на вредноста $z = (0, 7 + j0, 7) \Omega/\text{km}$. Се разбира дека поради тоа ќе дојде до промена на сите параметри на кабелот, па според тоа ќе се промени и неговата влезна импеданција Z_{vl} .

Со повторни пресметки, на начин што е сосема идентичен на оној од претходниот пример, или со примена на функцијата `neizolian_param` добиваме

```
>> [Zvl,k,Zp,Yp] = neizolian_param(100,0.75,0.7,0.045,0.7+0.7j,5)
Zvl =
    0.5133 + 0.1515i
k =
    0.4025 - 0.2402i
Zp =
    0.5044 + 0.8035i
Yp =
    1.2426 - 0.1301i
```

од каде што гледаме дека е

$$\underline{Z}_{vl} = 0,535 \cdot e^{j16,4^\circ} \Omega; \quad \underline{k}_i = 0,469 \cdot e^{-j30,8^\circ},$$

Заклучуваме дека кај заситените кабли се намалува влезната импеданција но во исто време се зголемува коефициентот на изнесениот потенцијал.

□ □ □

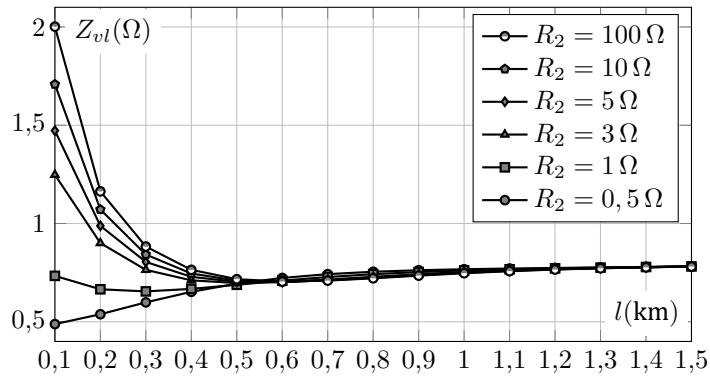
Пример 8.3. Да се пресмета зависноста на големината на влезната импеданција \underline{Z}_{vl} на кабелот од примерот 8.1 во незаситена состојба на челичната арматура $[\underline{z} = (0,7 + j2) \Omega]$ од неговата должина l , за разни вредности на отпорноста R_2 на заштитното заземјување на ТС СН/НН приклучена на неговиот крај, и тоа за следните вредности $R_2 \in \{0, 5; 1; 3; 5; 10; 100\} \Omega$.

Решение

Со повеќекратна примена на постапката изложена во примерот 8.1, за разни вредности на должината на водот l во интервалот од 100 до 1500 m, со помош на следната програма се добиваат резултатите прикажани во табелата П.8.3.1. Зависноста на коефициентот на изнесениот потенцијал $k_i(l)$ е прикажана во табелата П.8.3.2. На сликите П.8.3.1 и П.8.3.2 овие зависимости се прикажани во графички облик.

programi/kabli/kabel_3.m

```
1 clear;
2 l = (0.1:0.1:1.5)';
3 Z2 = [0.5 1 3 5 10 100]';
4 for i = 1:length(l)
5     for j = 1:length(Z2)
6         [Zvl(i,j),k(i,j)] = ...
7             neizolian_param(100,l(i),0.7,0.045,0.7+2j,Z2(j));
8     end
9 end
10 figure; plot(l,abs(Zvl)); grid;
11 figure; plot(l,abs(k)); grid;
```



Слика П.8.3.1. Зависност $Z_{vl}(l)$ за кабел тип IPO 13 3×95 6/10 со разни вредности на параметарот R_2

Табела П.8.3.2. Табеларен приказ на зависноста $k_i(l)$

l (km)	R_2 (Ω)					
	0,5	1	3	5	10	100
0,1	0,808	0,898	0,956	0,967	0,975	0,981
0,2	0,608	0,757	0,875	0,898	0,915	0,930
0,3	0,455	0,612	0,763	0,797	0,822	0,845
0,4	0,346	0,486	0,639	0,677	0,707	0,734
0,5	0,268	0,384	0,521	0,557	0,586	0,614
0,6	0,211	0,303	0,418	0,450	0,476	0,502
0,7	0,167	0,241	0,334	0,361	0,383	0,404
0,8	0,133	0,192	0,267	0,289	0,307	0,324
0,9	0,107	0,154	0,214	0,231	0,246	0,260
1,0	0,086	0,124	0,172	0,186	0,197	0,209
1,1	0,069	0,100	0,138	0,150	0,159	0,168
1,2	0,056	0,080	0,112	0,121	0,128	0,136
1,3	0,045	0,065	0,090	0,097	0,104	0,110
1,4	0,037	0,053	0,073	0,079	0,084	0,089
1,5	0,030	0,043	0,059	0,064	0,068	0,072

Од резултатите се забележува дека доколку кабелот е подолг од 500 m вредноста на Z_{vl} не зависи ниту од должината l ниту од R_2 . Тоа е така затоа што кабелот по целата должина е во допир со земјата и од

Табела П.8.3.1. Табеларен приказ на зависноста $Z_{vl}(l)$

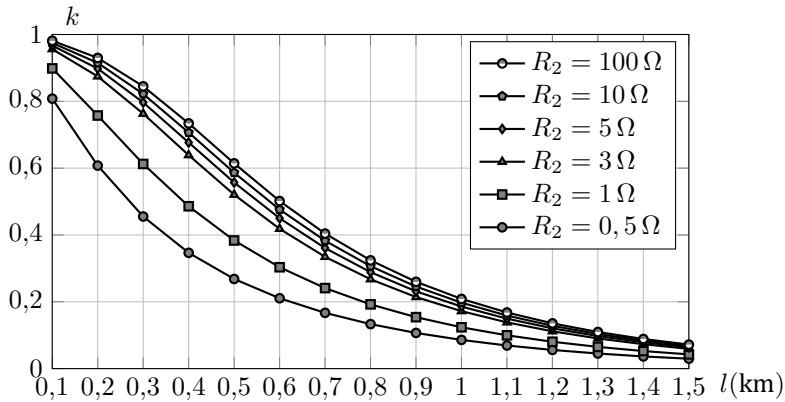
l (km)	R_2 (Ω)					
	0,5	1	3	5	10	100
0,1	0,488	0,734	1,248	1,473	1,708	2,002
0,2	0,538	0,665	0,901	0,988	1,071	1,164
0,3	0,599	0,655	0,764	0,805	0,842	0,883
0,4	0,652	0,667	0,711	0,729	0,746	0,764
0,5	0,694	0,688	0,697	0,703	0,709	0,717
0,6	0,723	0,709	0,702	0,702	0,703	0,705
0,7	0,742	0,728	0,715	0,712	0,711	0,709
0,8	0,755	0,742	0,729	0,726	0,723	0,721
0,9	0,762	0,753	0,742	0,739	0,737	0,735
1,0	0,767	0,761	0,753	0,751	0,749	0,747
1,1	0,771	0,767	0,762	0,760	0,759	0,758
1,2	0,774	0,772	0,769	0,768	0,767	0,766
1,3	0,777	0,776	0,774	0,773	0,773	0,772
1,4	0,779	0,779	0,778	0,778	0,777	0,777
1,5	0,782	0,782	0,781	0,781	0,781	0,781

него континуирано истекува струја во земјата. Струјата која што од почетокот на кабелот тргнува да тече кон неговиот крај во голема мерка ќе се „потроши“ со истекување во земјата така што на крајот од кабелот ќе стигне многу мала струја. Тоа практично значи дека крајните делови на кабелот, од кои тече многу мала струја, се „отсечени“ од почетокот на кабелот и не влијаат на приликите во колото.

□ □ □

Пример 8.4. Повторно се посматра кабелот од примерот 8.1 кој работи во режим на одведување на струја на доземен спој настанат на ВН страна во ТС ВН/СН. Притоа потенцијалот на заземјувачот во ТС ВН/СН изнесува $U_1 = 1000$ V. Да се пресметаат зависностите $I(x)$ и $U(x)$ на струјата и напонот долж на плаштот од кабелот во ваквиот режим. Каква ќе биде зависноста $J_0(x)$ на линиската густина на струјата на одведување во земјата од плаштот на кабелот.

Решение



Слика П.8.3.2. Зависност $k_i(l)$ за кабел тип IPO 13 3×95 6/10 со разни вредности на параметарот R_2

Зависностите $U(x)$ и $I(x)$ по должината на плаштот од кабелот за време на земјоспојот ќе ги пресметаме со помош на релациите (8.8)

$$\begin{aligned} \underline{U}(x) &= \underline{U}_2 \cdot \text{ch}\underline{\gamma}(l-x) + \underline{Z}_C \cdot \underline{I}_2 \cdot \text{sh}\underline{\gamma}(l-x), \\ \underline{I}(x) &= \frac{\underline{U}_2}{\underline{Z}_C} \cdot \text{sh}\underline{\gamma}(l-x) + \underline{I}_2 \cdot \text{ch}\underline{\gamma}(l-x), \end{aligned} \quad (\text{П.8.4.1})$$

или, пак, со помош на следните релации, во кои фигурираат приликите на почетокот од кабелот \underline{U}_1 и \underline{I}_1

$$\begin{aligned} \underline{U}(x) &= \underline{U}_1 \cdot \text{ch}\underline{\gamma}x - \underline{Z}_C \cdot \underline{I}_1 \cdot \text{sh}\underline{\gamma}x, \\ \underline{I}(x) &= -\frac{\underline{U}_1}{\underline{Z}_C} \cdot \text{sh}\underline{\gamma}x + \underline{I}_1 \cdot \text{ch}\underline{\gamma}x. \end{aligned} \quad (\text{П.8.4.2})$$

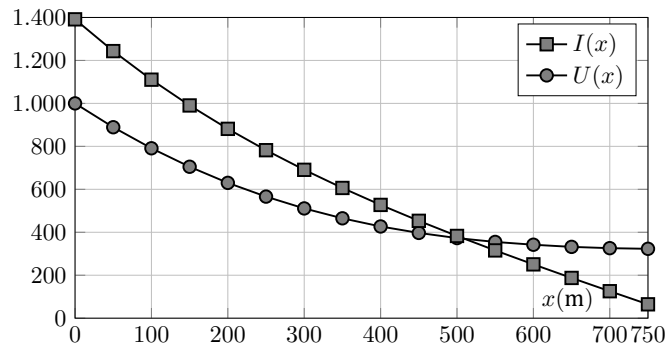
За да можеме директно да ги примениме последните релации ќе треба да ја пресметаме уште струјата \underline{I}_1 . Неа ќе ја добиеме од односот

$$\underline{I}_1 = \frac{\underline{U}_1}{\underline{Z}_{vl}} = \frac{1000}{0,719 \cdot e^{j34^\circ}} = (1154 - j777,1) = 1391,3 \cdot e^{-j34^\circ} \text{ A.}$$

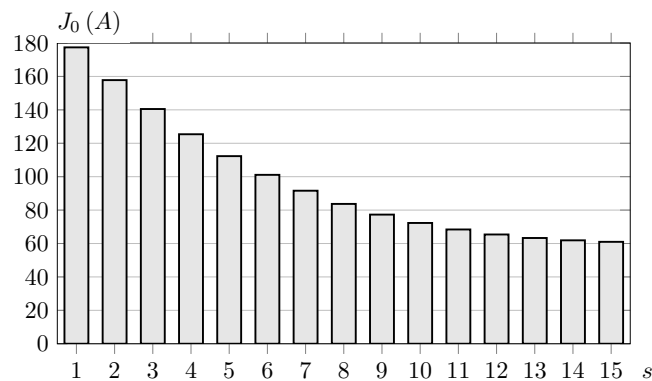
Сега со директна замена на вредностите за \underline{U}_1 и \underline{I}_1 во (П.8.4.2), за разни вредности на координатата x (растојание од почетокот на кабелот), ќе ја добиеме табелата П.8.4.1. Врз основа на оваа табела се формирани кривите од слика П.8.4.1 на која се прикажани зависностите $U(x)$ и $I(x)$. На сликата П.8.4.2 е прикажана зависноста $J_0(s)$ на струјата на одведување во земја од поедините сегменти $s = 1, 2, \dots, 15$ на плаштот од кабелот чии должини изнесуваат по 50 m. Во неа со $s = 1$ е означен првиот сегмент на кабелот ($0 < x < 50$ m), со $s = 2$ е означен вториот сегмент ($50 < x < 100$ m) итн.

Табела П.8.4.1. Зависност $U(x)$, $I(x)$ и $J_0(x)$ по должината на кабелот

x (m)	0	50	100	150	200	250	300	350
U (V)	1000	889	791	705	630	566	511	465
I (A)	1391,3	1243,4	1110,4	990,4	881,5	782,1	690,8	606,3
J_0 (A)	177,4	157,8	140,5	125,4	112,3	101,1	91,6	83,7
x (m)	400	450	500	550	600	650	700	750
U (V)	427	397	373	355	342	332	326	323
I (A)	527,4	453,3	382,9	315,5	250,6	187,4	125,6	64,6
J_0 (A)	77,3	72,3	68,4	65,4	63,3	61,9	61,0	/



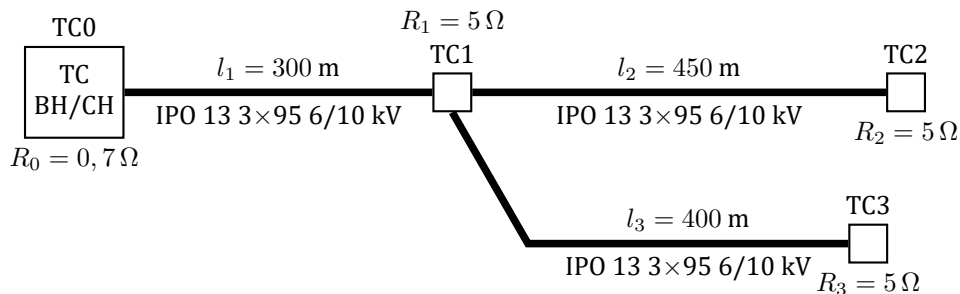
Слика П.8.4.1. Распределба на напонот $U(x)$ и струјата $I(x)$ по должината на кабелот



Слика П.8.4.2. Струја на одведување во земјата $J_0(x)$ од поедините сегменти

□ □ □

Пример 8.5. Во кабелската делница долга $l = 750$ m (пример 8.1) се вметнува нова ТС СН/НН, означена како ТС1, која се наоѓа на растојание $l_1 = 300$ m од почетокот на кабелот (слика П.8.5.1). Истовремено од ТС1 се полага кабел кон нова ТС СН/НН означена како ТС3, со должина $l_3 = 400$ m. Да се пресмета влезната импеданција на почетокот на кабелскиот извод $\underline{Z}_{vl.1}$. Колкави се струите и напоните во заземјувачкиот систем од прикажаната кабелска мрежа за случајот кога во мрежестиот заземјувач од ТС ВН/СН, чија што отпорност на распростирање изнесува $R_0 = 0,7 \Omega$, се инјектира струја на доземен спој $J_0 = 1$ kA. Сите ТС СН/НН имаат исти вредности на отпорностите на распростирање на заштитното заземјување $R_1 = R_2 = R_3 = 5 \Omega$.



Слика П.8.5.1. 10 kV кабелска мрежа и модел на нејзиниот заземјувачки систем

Решение

Со помош на изразите (8.9) и (8.10) ќе ги пресметаме параметрите \underline{Z}_P и \underline{Y}_P на π -заменските шеми за одделните кабелски делници од мрежата. Резултатите од пресметките се наоѓаат сместени во табелата П.8.5.1.

Табела П.8.5.1. Параметри на π -заменските шеми на одделните кабелски секции од мрежата

Секција	$\underline{Z}_P (\Omega)$	$\underline{Y}_P (S)$
TC0 – TC1	$0,14034 + j0,65136$	$0,61750 - j0,03790$
TC1 – TC2	$0,08167 + j1,05700$	$0,84507 - j0,10671$
TC1 – TC3	$0,11637 + j0,91395$	$0,77440 - j0,07954$

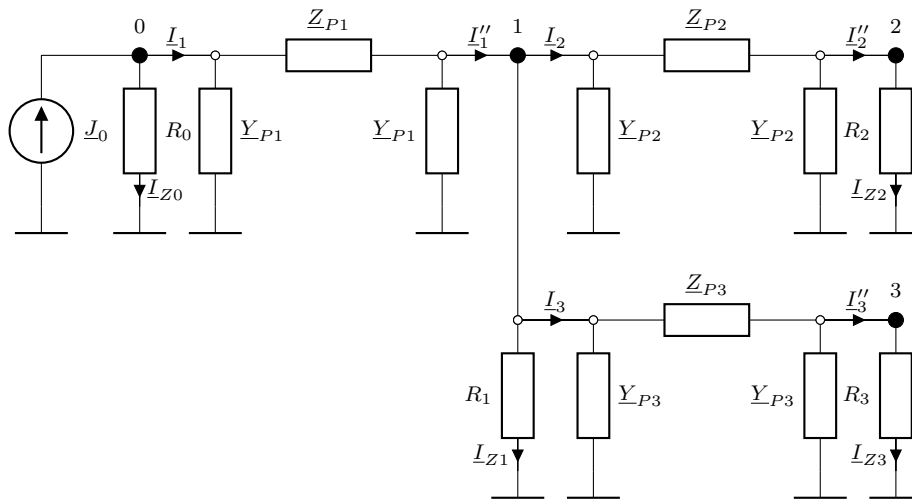
Покрај тоа со помош на изразите (8.11) и (8.12) ќе ги пресметаме влезните (еквивалентните) импеданции $\underline{Z}_{vl.2}$ и $\underline{Z}_{vl.3}$ како и коефициентите на изнесување на потенцијалот на втората и третата секција $k_{i.2}$ и $k_{i.3}$, водејќи сметка за нивните вистински должини l_2 и

l_3 како и за вредностите на импеданциите R_2 и R_3 на заземјувачите на краевите од овие кабелски секции. На тој начин го добиваме следниот резултат

$$\underline{Z}_{vl.2} = (0,64594 + j0,29855) = 0,7116 \cdot e^{j24,8^\circ} \Omega; \quad \underline{k}_{i.2} = 0,616 \cdot e^{-j42,4^\circ}$$

$$\underline{Z}_{vl.3} = (0,67522 + j0,27401) = 0,72870 \cdot e^{j22,1^\circ} \Omega; \quad \underline{k}_{i.3} = 0,677 \cdot e^{-j36,6^\circ}$$

На сликата П.8.5.2 е прикажано електричното коло со кое е претставен заземјувачкиот систем на набљудуваната кабелска мрежа. Во него секоја кабелска секција е претставена со соодветната π -еквивалентна шема, додека секој заземјувач во поедините ТС е прикажан со неговата отпорност на распространување. Во колото на ЗС фигурира и струјниот генератор \underline{J}_0 со којшто се моделира струјата на земјоспојот.

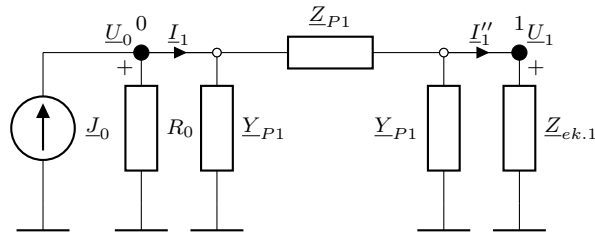


Слика П.8.5.2. Заземјувачки систем на 10 kV кабелска мрежа

Врз основа на сликата П.8.5.2 можеме да ја формираме упростената варијанта на посматраниот ЗС (слика П.8.5.3) во која фигурира само првата кабелска делница со својата π -заменска шема додека останатиот дел од мрежата, заедно со припадните отпорности на распространување на ТС СН/НН, вклучувајќи ја тука и отпорноста R_1 , се еквивалентирани со еквивалентна импеданција $\underline{Z}_{ek.1}$. Нејзината вредност, во согласност со слика П.8.5.2, ќе ја добиеме на следниот начин

$$\underline{Z}_{ek.1} = \underline{Z}_{vl.2} \parallel \underline{Z}_{vl.3} \parallel R_1 = (0,31327 + j0,12607) = 0,33768 \cdot e^{j21,9^\circ} \Omega.$$

Сега со помош на изразите (8.11) и (8.12) ќе ги пресметаме влезната импеданција $\underline{Z}_{vl.1}$ и коефициентот на изнесување на потенцијалот на



Слика П.8.5.3. Упростена варијанта на заземјувачкиот систем на 10 kV кабелска мрежа

првата секција $k_{i.1}$

$$\begin{aligned} \underline{Z}_{ek.1} &= \underline{Z}_C \cdot \frac{\text{ch}(\underline{\gamma}l_1) + \frac{\underline{Z}_C}{\underline{Z}_2} \cdot \text{sh}(\underline{\gamma}l_1)}{\text{sh}(\underline{\gamma}l_1) + \frac{\underline{Z}_C}{\underline{Z}_2} \cdot \text{ch}(\underline{\gamma}l_1)} = (0,46317 + j0,41965) = \\ &= 0,62501 \cdot e^{j42,2^\circ} \Omega, \end{aligned}$$

$$\underline{k}_{i.1} = \frac{1}{\text{ch}(\underline{\gamma}l_1) + \frac{\underline{Z}_C}{\underline{Z}_{ek.1}} \cdot \text{sh}(\underline{\gamma}l_1)} = (0,24523 - j0,22466) = 0,3326 \cdot e^{-j42,5^\circ}.$$

Според тоа, напонот \underline{U}_0 на заземјувачот во ТС ВН/СН ќе се добие кога еквивалентната импеданција на постројката \underline{Z}_{ek} ќе се помножи со инјектираната струја на доземен спој \underline{J}_0

$$\begin{aligned} \underline{Z}_{ek} &= R_0 \Pi \underline{Z}_{vl.1} = 0,7 \Pi 0,62501 \cdot e^{j42,2^\circ} = 0,35381 \cdot e^{j22,34^\circ} \Omega; \\ \underline{U}_0 &= \underline{Z}_{ek} \cdot \underline{J}_0 = 353,81 \cdot e^{j22,34^\circ} \text{V}. \end{aligned}$$

Сега можеме да ги пресметаме и останатите напони и струи во заземјувачкиот систем

$$\begin{aligned} \underline{I}_1 &= \frac{\underline{U}_0}{\underline{Z}_{ek}} = \frac{353,81 \cdot e^{j22,34^\circ}}{0,62501 \cdot e^{j42,2^\circ}} = 566,084 \cdot e^{-j19,86^\circ} \text{A}; \\ \underline{U}_1 &= \underline{k}_{i.1} \cdot \underline{U}_0 = 0,3326 \cdot e^{-j42,5^\circ} \cdot 353,81 \cdot e^{j22,34^\circ} = 117,7 \cdot e^{-j20,16^\circ} \text{V}; \\ \underline{I}_2 &= \frac{\underline{U}_1}{\underline{Z}_{vl.2}} = \frac{117,7 \cdot e^{-j20,16^\circ}}{0,7116 \cdot e^{j24,8^\circ}} = 165,4 \cdot e^{-j44,96^\circ} \text{A}; \\ \underline{U}_2 &= \underline{k}_{i.2} \cdot \underline{U}_1 = 0,616 \cdot e^{-j42,4^\circ} \cdot 117,7 \cdot e^{j22,34^\circ} = 72,5 \cdot e^{-j20,06^\circ} \text{V}; \\ \underline{I}_3 &= \frac{\underline{U}_1}{\underline{Z}_{vl.3}} = \frac{117,7 \cdot e^{-j20,16^\circ}}{0,7287 \cdot e^{j22,1^\circ}} = 161,5 \cdot e^{-j42,26^\circ} \text{A}; \\ \underline{U}_3 &= \underline{k}_{i.3} \cdot \underline{U}_1 = 0,677 \cdot e^{-j36,6^\circ} \cdot 117,7 \cdot e^{j22,34^\circ} = 79,7 \cdot e^{-j14,26^\circ} \text{V}. \end{aligned}$$

Струите во одделните заземјувачи се

$$I_{Z0} = U_0/R_0 = 353,81/0,7 = 505,44 \text{ A};$$

$$I_{Z1} = U_1/R_1 = 117,7/5 = 23,54 \text{ A};$$

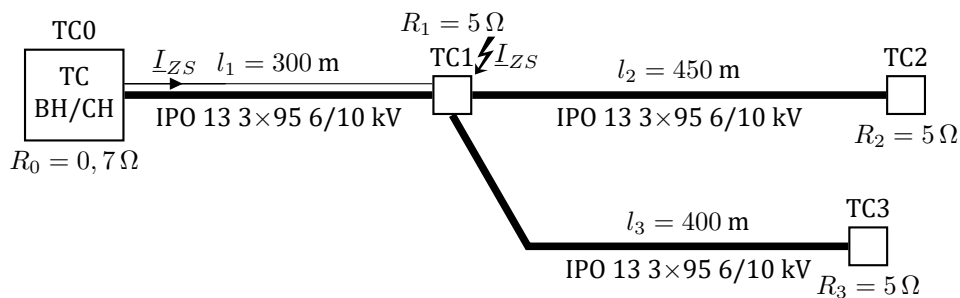
$$I_{Z2} = U_2/R_2 = 72,5/5 = 14,5 \text{ A};$$

$$I_{Z3} = U_3/R_3 = 79,7/5 = 15,94 \text{ A}.$$

□ □ □

Пример 8.6. Се посматра кабелската мрежа анализирана во примерот 8.5, во режим на земјоспој, настанат при ТС1. Струјата на земјоспојот изнесува $\underline{I}_{ZS} = 300 \text{ A}$. Да се пресметаат напоните во одделните јазли и струите во заземјувачите од постројките ТС0 и ТС1 во таквиот режим. Пресметките да се направат на два начина

- Со занемарување на заемната спрега фазен спроводик – метален плашт кај кабелот од првата делница низ кој што тече струјата на грешка,
- Со нејзиното земање предвид. Редукциониот фактор на сите кабли од мрежата изнесува $r_{f1} = r_{f2} = r_{f3} = r_f = 0,23 \cdot e^{j12^\circ}$.



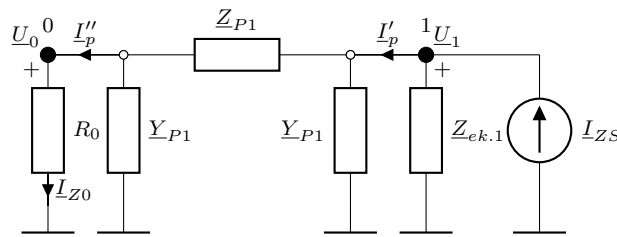
Слика П.8.6.1. 10 kV кабелска мрежа и модел на нејзиниот заземјувачки систем

Решение

И во овој случај ќе извршиме замена на двете кабелски делници ТС1-ТС2 и ТС1-ТС3 со нивните влезни импеданции, а потоа тие, заедно со отпорноста на распростирање на заземјувачот R_1 , ќе ги еквивалентираме со една еквивалентна импеданција \underline{Z}_{ek1} , како во примерот 8.5 (слика П.8.6.2). Параметрите на така добиеното коло

(видете пример 8.5) ќе бидат

$$\begin{aligned} \underline{Z}_{P1} &= (0,14034 + j0,65156) \Omega; \\ \underline{Y}_{P1} &= (0,61750 - j0,0379) \text{ S}; \\ \underline{Z}_{ek.1} &= (0,31327 + j0,12607) \Omega. \end{aligned}$$



Слика П.8.6.2. Работа на заземјувачкиот систем на 10 kV кабелска мрежа во режим на земјоспој

а) Решавање на заземјувачкиот систем без уважување на спрегата фазен спроводник - метален плашт

Колото на заземјувачкиот систем ќе го решиме на тој начин што најнапред ќе ја пресметаме влезната импеданција $\underline{Z}_{vl.1}$ во јазелот 1, а потоа и неговиот напон $\underline{U}_1 = \underline{Z}_{vl.1} \cdot \underline{I}_{ZS}$. Притоа имаме

$$\begin{aligned} \underline{Z}_{vl.1} &= (R_0 \Pi \underline{Y}_{P1}^{-1} + \underline{Z}_{P1}) \Pi \underline{Z}_{ek.1} \Pi \underline{Y}_{P1}^{-1} = \\ &= (0,1987 + j0,0934) = 0,2196 \cdot e^{j25,2^\circ} \Omega; \\ \underline{I}_{ZS} &= \underline{I}_{ZS} \cdot e^{j0} = 300 \text{ A}; \\ \underline{U}_1 &= \underline{Z}_{vl.1} \cdot \underline{I}_{ZS} = (59,622 + j28,034) = 65,884 \cdot e^{j25,2^\circ} \text{ kV}; \\ \underline{U}_0 &= \frac{R_0 / (1 + R_0 \cdot \underline{Y}_{P1})}{R_0 / (1 + R_0 \cdot \underline{Y}_{P1}) + \underline{Z}_{P1}} \cdot \underline{U}_1 = \\ &= (33,134 - j12,167) = 35,297 \cdot e^{-j20,2^\circ} \text{ kV}. \end{aligned}$$

За струите во заземјувачите во ТС0 и ТС1 добиваме

$$\begin{aligned} \underline{I}_{Z0} &= \underline{U}_0 / R_0 = (47,334 - j17,382) = 50,424 \cdot e^{-j20,2^\circ} \text{ A} \\ \underline{I}_{Z1} &= \underline{U}_1 / R_1 = (11,924 + j5,607) = 13,177 \cdot e^{j25,2^\circ} \text{ A}. \end{aligned}$$

Струите во плаштот од кабелот \underline{I}'_p и \underline{I}''_p ќе бидат

$$\begin{aligned} \underline{I}'_p &= (\underline{U}_1 - \underline{U}_0) / \underline{Z}_{P1} + \underline{Y}_{P1} \cdot \underline{U}_1 = (105,21 - j11,10) = 105,8 \cdot e^{-j6,0^\circ} \text{ A}; \\ \underline{I}''_p &= (\underline{U}_1 - \underline{U}_0) / \underline{Z}_{P1} - \underline{Y}_{P1} \cdot \underline{U}_0 = (47,33 - j17,38) = 50,44 \cdot e^{-j20,2^\circ} \text{ A}. \end{aligned}$$

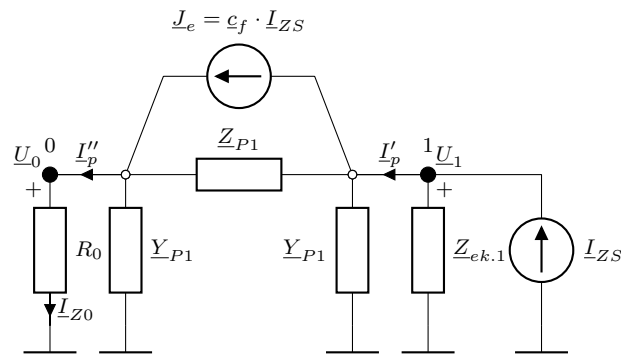
Вкупната струја на одведување во земја од плаштот од кабелот ќе биде $\underline{I}'_p - \underline{I}''_p$

$$\Delta \underline{I}_p = \underline{I}'_p - \underline{I}''_p = (82,16 + j12,42) = 83,1 \cdot e^{j8,6^\circ} \text{ A.}$$

а) Решавање на КЗС со уважување на спрегата фазен спроводник – метален плашт

Во согласност со изложеното во точката 8.3.4, во овој случај во колото на заземјувачкиот систем ќе се појави уште еден струен генератор, како што е тоа прикажано на сликата П.8.6.3. Неговата струја ќе изнесува

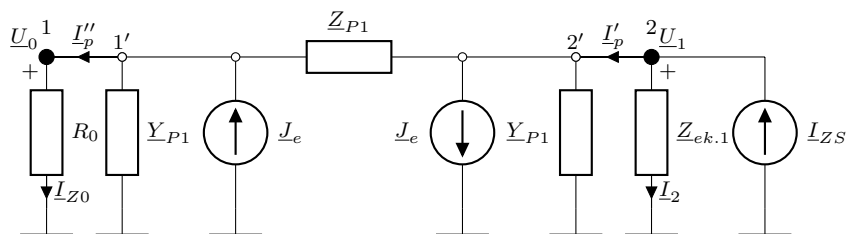
$$\underline{J}_e = c_f \cdot \underline{I}_{ZS} = (1 - r_f) \cdot \underline{I}_{ZS} = (232,51 - j14,345) = 232,95 \cdot e^{-j3,53^\circ} \text{ A.}$$



Слика П.8.6.3. Еквивалентна шема на заземјувачкиот систем со уважување на редукциониот фактор на кабелот

Решавањето на состојбата во колото од слика П.8.6.3 може да се изврши на разни начини, но наједноставно е да се примени матричната постапка изложена во 9-тото поглавје.

Заради поедноставно матрично изразување и програмирање, ќе извршиме пренумерација на јазлите во колото, како што е тоа направено на сликата П.8.6.4.



Слика П.8.6.4

Нека со \underline{Y} ја означиме матрицата на адмитанции на колото на заземјувачкиот систем, додека со $\underline{Z} = \underline{Y}^{-1}$ нејзината инверзна матрица. Тогаш врз основа на сликата П.8.6.4 можеме да пишуваме

$$\underline{Y} = \begin{bmatrix} 1/R_0 + \underline{Y}_{P1} + 1/\underline{Z}_{P1} & -1/\underline{Z}_{P1} \\ -1/\underline{Z}_{P1} & 1/\underline{Z}_{ek} + \underline{Y}_{P1} + 1/\underline{Z}_{P1} \end{bmatrix} =$$

$$= \begin{bmatrix} 2,362 - j1,505 & -0,316 + j1,467 \\ -0,316 + j1,467 & 3,681 - j2,610 \end{bmatrix} \text{ S};$$

$$\underline{Z} = \underline{Y}^{-1} = \begin{bmatrix} 0,3273 + j0,1345 & 0,1104 - j0,0406 \\ 0,1104 - j0,0406 & 0,1987 + j0,0934 \end{bmatrix} \Omega.$$

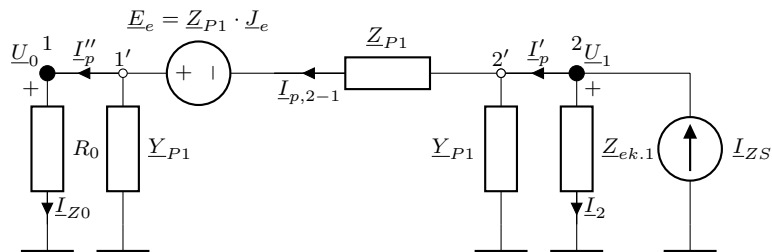
За пресметување на напоните во колото ќе го користиме моделот којшто произлегува од примената на методот на јазлови потенцијали $\underline{U} = \underline{Z} \cdot \underline{J}$ каде што, со оглед на сликата П.8.6.4, матрицата на инјектирани струи \underline{J} во овој случај ќе биде

$$\underline{J} = \begin{bmatrix} \underline{J}_e & \underline{I}_{ZS} - \underline{J}_e \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} 232,51 - j14,34 & 67,49 + j14,34 \end{bmatrix}^T \text{ A.}$$

Понатаму следува пресметување на напоните во јазлите

$$\underline{U} = \underline{Z} \cdot \underline{J} = \begin{bmatrix} \underline{U}_1 \\ \underline{U}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 86,063 + j25,420 \\ 37,171 - j1,854 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 89,739 \cdot e^{-j16,5^\circ} \\ 37,217 \cdot e^{-j2,9^\circ} \end{bmatrix} \text{ kV.}$$

Откога ги пресметавме напоните \underline{U} пристапуваме кон пресметување на струите во гранките. Но сега, наместо да се користиме со колото од сликата П.8.6.4, која што служи само за пресметување напоните, се враќаме во изворната шема на колото, прикажана на сликата П.8.6.5, во која еквивалентниот струен генератор \underline{J}_e е заменет со изворниот напонски генератор $\underline{E}_e = \underline{Z}_{P1} \cdot \underline{J}_e$ којшто е резултат на заемната магнетска спрега помеѓу фазниот спроводник и металниот плашт од кабелот.



Слика П.8.6.5

Од оваа шема произлегуваат следните релации

- струја во заземјувачот од ТС0

$$\underline{I}_{Z0} = \underline{U}_1 / R_0 = (122,95 + j36,315) = 128,2 \cdot e^{j16,5^\circ} \text{ A}$$

- струја во заземјувачот од ТС1

$$\underline{I}_{Z1} = \underline{U}_2 / R_2 = (7,434 - j0,371) = 7,44 \cdot e^{-j2,9^\circ} \text{ A.}$$

- струја $\underline{I}_{p,2-1}$

$$\underline{U}_2 - \underline{Z}_{P1} \cdot \underline{I}_{p,2-1} + \underline{E}_e = \underline{U}_1$$

$$\underline{I}_{p,2-1} = \frac{\underline{U}_2 - \underline{U}_1}{\underline{Z}_{P1}} + \frac{\underline{E}_e}{\underline{Z}_{P1}} = \frac{\underline{U}_2 - \underline{U}_1}{\underline{Z}_{P1}} + \underline{J}_e = (177,05 + j48,75) \text{ A.}$$

- струја во плаштот на кабелот на почетокот

$$\underline{I}'_p = \underline{I}_{p,2-1} + \underline{Y}_{P1} \cdot \underline{U}_2 = (199,94 + j46,195) \text{ A.}$$

- струја во плаштот на кабелот на крајот

$$\underline{I}''_p = \underline{I}_{p,2-1} - \underline{Y}_{P1} \cdot \underline{U}_1 = (122,95 + j36,315) \text{ A.}$$

Вкупната струја на одведување во земја од плаштот од кабелот ќе биде разликата $\underline{I}'_p - \underline{I}''_p$

$$\Delta \underline{I}_p = \underline{I}'_p - \underline{I}''_p = (76,99 + j9,88) = 77,62 \cdot e^{j7,3^\circ} \text{ A.}$$

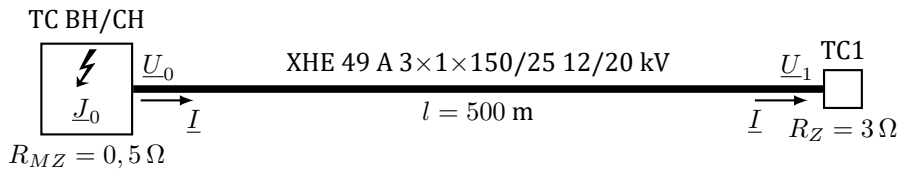
Очигледно е дека напоните и струите во колото во овој случај значително се разликуваат од оние кои што се однесуваат на претходниот случај а). Поради присуството на заемната спрега проблемите се преместија во изворната графостаница ТС0. Сега дојде до намалување на напонот \underline{U}_1 и струјата \underline{I}_{Z1} за 1,77 пати, што е поволно од аспект на сигурноста во ТС1, но во исто време дојде до зголемување на напонот \underline{U}_0 и струјата \underline{I}_{Z0} за 2,54 пати. Струјата во плаштот од кабелот на неговиот почеток \underline{I}'_p , под дејство на индуцираната е.м. сила, се зголеми за 1,94 пати, додека вкупната струја на одведување во земјата преку металниот плашт од кабелот и во двата разгледувани случаја остана практично иста.

□ □ □

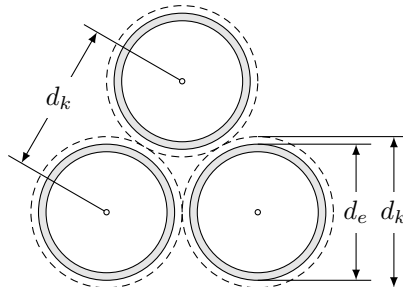
Пример 8.7. Трифазен кабелски вод со полиетиленска изолација, тип ХНЕ 49 А 3×1×150/25 12/20 kV, напојува ТС СН/НН (слика П.8.7.1). Должината на кабелот изнесува $l = 500 \text{ m}$. Жилите на кабелот се сместени во кабелски ров на длабочина $h = 0,7 \text{ m}$ во формација триаголник. Надворешниот механички пречник на секоја жила изнесува

$d_k = 3$ cm. Секоја жила над изоацијата има т.н. „електрична заштита“ во форма на бакарни жици преку кои се намотани и бакарни ленти, со вкупен пресек 25 mm^2 . Таа може да се еквивалентира со една шуплива цевка со надворешен пречник $d_e = 2,5$ cm. Растојанието помеѓу оските на таквите шупливи цевки изнесува d_k (слика П.8.7.2). Заштитното заземјување на ТС СН/НН има отпорност $R_Z = 3 \Omega$. Специфичната отпорност на тлото изнесува $\rho = 100 \Omega \text{ m}$.

Да се определи π -заменската шема на кабелот а потоа, со помош на неа, да се пресмета колкава е струјата I на почетокот од кабелот што се одведува од напојната ТС ВН/СН за време на земјоспојот ако потенцијалот на неговиот мрежест заземјувач изнесува $U_0 = 1000 \text{ V}$, а отпорноста на распространување на неговиот мрежест заземјувач изнесува $R_0 = R_{MZ} = 0,5 \Omega$.



Слика П.8.7.1. Кабел со изолиран метален плашт, тип ХНЕ 49 А



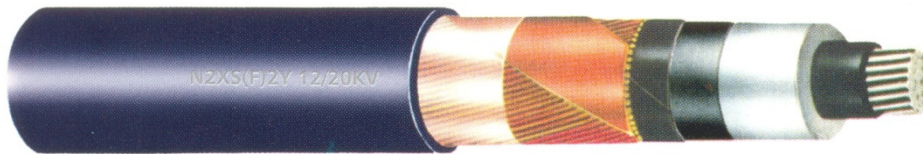
Слика П.8.7.2. Диспозиција на кабелските жили

Решение

Каблите од типот тип ХНЕ 49 А 150/25 12/20 kV, како што е тоа прикажано на сликата П.8.7.3, се едножилни. Тие во својата конструкција, гледано од средината на кабелот кон неговата периферија, ги содржат следните елементи

1. спроводници од алуминиум (во случајов алуминиумско јаже со пресек 150 mm^2);
2. полупроводен слој преку спроводникот кој врши мазнење на електричното поле на површината од спроводникот и кој наедно

- ја претставува првата електрода од коаксиалниот кондензатор во кој што се наоѓа изолацијата на жилата;
3. изолација од вмрежен полиетилен (Crosslinked polyethylene XLPE);
 4. надворешен полупроводен слој преку изолацијата кој што ја претставува втората електрода од коаксиалниот кондензатор (што значи дека овој кабел е Н-кабел со регулирано електрично поле така што тоа е строго радијално);
 5. електрична заштита составена од бакарни жици и бакарни ленти, хеликоидално намотани околу јадрото од кабелот. Таа има основна задача да изврши локализација на електричниот лак при дефект (пробив) на кабелската изолација но и задача на дополнителна надворешна електрода (во случајов со пресек 25 mm^2);
 6. надворешен заштитен слој од полиетилен, кој всушност претставува и плашт кој го спречува продорот на влагата и другите штетни материи во неговата внатрешност од средината во која што е поставен кабелот.



Слика П.8.7.3. Конструкција на каблите од типот ХНЕ 49 А $3 \times 1 \times 150/25$ 12/20 kV

Надворешниот заштитен слој, т.е. плаштот на кабелот, е одличен електричен изолатор и не дозволува галвански контакт на бакарната електрична заштита од кабелот со земјата. На тој начин, во услови на земјоспој во мрежата, струјата на грешка ќе тече во бакарниот заштитен слој во аксиален правец, од едниот кон другиот крај на кабелот а заменската шема на овој кабел, посматран како елемент на заземјувачкиот систем, ќе биде без напречни гранки.

Според тоа за време на земјоспојот, кога напонот на почетокот од кабелот ќе добие вредност $U_0 = 1000 \text{ V}$, по електричната заштита на секоја жила од трифазниот кабелски вод ќе тече струја кон напојуваната ТС СН/НН. Од причини на симетрија по електричната заштита на секоја жила ќе тече по $1/3$ од вкупната струја I што се одведува (т.е. изнесува) преку кабелот.

Во овој случај бидејќи нема одведување на струја во земјата, π -заменската шема на кабелот ќе содржи само редна гранка, т.е.:

$$\underline{Z}_P = \underline{z} \cdot l = (r + jx) \cdot l, \quad \underline{Y}_P = 0.$$

Подолжната импеданција на кабелот z , која се состои од активен дел r што зависи од вкупниот пресек на сите три електрични заштити на жилите од кабелот, и од реактивен дел x , што се должи на индуктивноста на „снопот“ од трите жили. Неа ќе ја добиеме на следниот начин

$$r_{Cu} = \frac{1000}{\kappa_{Cu} \cdot S_{Cu}} = \frac{1000 \cdot \rho_{Cu}}{S_{Cu}} = \frac{18}{3 \cdot 25} = 0,24 \frac{\Omega}{\text{km}};$$

$$r = r_z + r_{Cu} = 0,05 + 0,24 = 0,29 \frac{\Omega}{\text{km}}.$$

Сопственото средно-геометриско растојание D_s на снопот што го формираат трите електрични заштити на жилите, означени со А, В и С, по методот на средногеометриско растојание (СГР), ќе биде

$$D_s = \sqrt[3]{(D_{AA} \cdot D_{AB} \cdot D_{AC}) \cdot (D_{BA} \cdot D_{BB} \cdot D_{BC}) \cdot (D_{CA} \cdot D_{CB} \cdot D_{CC})}.$$

Бидејќи сопствените СГР на спроводниците во форма на шуплива цевка со среден радиус r_{sr} е приближно еднакво на надворешниот радиус на цевката $r_e = d_e/2$, ќе имаме

$$D_{AA} = D_{BB} = D_{CC} = r_{sr} \approx d_e/2 = 1,25 \text{ cm},$$

и истовремено важи

$$D_{ij} = d_k; \quad i = A, B, C; \quad j = A, B, C; \quad j \neq i.$$

Лесно се покажува дека за СГР на целиот сноп ќе добиеме

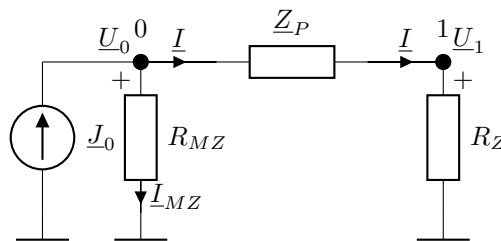
$$D_s = \sqrt[3]{(d_e/2)^3 \cdot d_k^6} = \sqrt[3]{(d_e/2) \cdot d_k^2} = \sqrt[3]{1,25 \cdot 3^2} = 2,241 \text{ cm}.$$

Реактанцијата x по единица должина на кабелскиот сноп ќе биде

$$x = 0,1445 \cdot \log \frac{D_{ek}}{D_s} = 0,1445 \cdot \log \frac{930,6}{0,02241} = 0,668 \frac{\Omega}{\text{km}};$$

$$D_{ek} = 658 \cdot \sqrt{\rho/f} = 658 \cdot \sqrt{100/50} = 930,6 \text{ m};$$

$$z = (r + jx) = (0,29 + j0,668) = 0,728 \cdot e^{j66,5^\circ} \frac{\Omega}{\text{km}}.$$



Слика П.8.7.4. Еквивалентно коло на заземјувачкиот систем

Сега врз основа на сликата П.8.7.4 можеме да ги пресметаме потребните величини

$$\begin{aligned} \underline{U}_1 &= \frac{R_Z}{\underline{Z}_P + R_Z} \cdot U_0 = \frac{3}{3,145 + j0,334} \cdot 1000 = \\ &= (943,3 - j100,1) = 948,6 \cdot e^{-j6,1^\circ} \text{ V}; \end{aligned}$$

$$\underline{I} = \frac{\underline{U}_0}{\underline{Z}_P + R_Z} = \frac{1000}{3,145 + j0,334} = (314,4 - j33,4) = 316,2 \cdot e^{-j6,1^\circ} \text{ A}.$$

Според тоа вкупната струја на одведување што ќе тече низ сите три бакарни заштити од жилите на кабелот ќе биде 316,2 А, додека низ секоја бакарна заштита од жилата ќе тече по 105,4 А.

Вкупната струја на земјоспој \underline{J}_0 , според сликата П.8.7.4, ќе биде

$$\begin{aligned} \underline{J}_0 &= \underline{I}_{MZ} + \underline{I} = \frac{\underline{U}_0}{R_{MZ}} + \underline{I} = \frac{1000}{0,5} + (314,4 - j33,4) = \\ &= (2314,4 - j33,4) = 2315 \cdot e^{-j0,83^\circ} \text{ A}. \end{aligned}$$

□ □ □

Пример 8.8. Се посматра режим со земјоспој на крајот од кабелскиот вод од примерот 8.7. Струјата на земјоспој (еднофазна куса врска) изнесува $\underline{I}_{KV} = 300 \text{ A}$. Да се пресмета еквивалентната импеданција \underline{Z}_e на кабелскиот вод со помош на моделот од точката 8.3.2. Колкав е неговиот редукионен фактор r_f , а колкава струјата на еквивалентниот струен генератор \underline{J}_e со помош на која се опфаќа влијанието на заемните спреги фазен спроводник - метални екрани на трите кабелски жили. Колкави ќе бидат напоните и струите во колото на заземјувачкиот систем во овој случај.

Решение

Најнапред со помош на релациите (8.48) ќе ги пресметаме сопствените \underline{Z}_s и меѓусебните \underline{Z}_m импеданции на кабелските екрани

$$\begin{aligned} \underline{Z}_s &= \left(0,05 + r_e + j0,1445 \cdot \log \frac{D_{ek}}{d_e/2} \right) \cdot l = \\ &= \left(0,05 + \frac{18}{25} + j0,1445 \cdot \log \frac{930,6}{0,0125} \right) \cdot 0,5 = (0,3850 + j0,3520) \Omega, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \underline{Z}_m &= \left(0,05 + j0,1445 \cdot \log \frac{D_{ek}}{D} \right) \cdot l = \\ &= \left(0,05 + j0,1445 \cdot \log \frac{930,6}{0,030} \right) \cdot 0,5 = (0,0250 + j0,3245) \Omega. \end{aligned}$$

На сличен начин, со помош на (8.49) се добиваат и меѓусебните импеданции на релација фазен спроводик од фазата A и трите кабелски екрани. Притоа, како резултат се добива

$$\begin{aligned}\underline{M}_s &= (0,0250 + j0,3520) = 0,3529 \cdot e^{j85,9^\circ} \Omega, \\ \underline{M}_m &= (0,0250 + j0,3245) = 0,3255 \cdot e^{j85,6^\circ} \Omega\end{aligned}$$

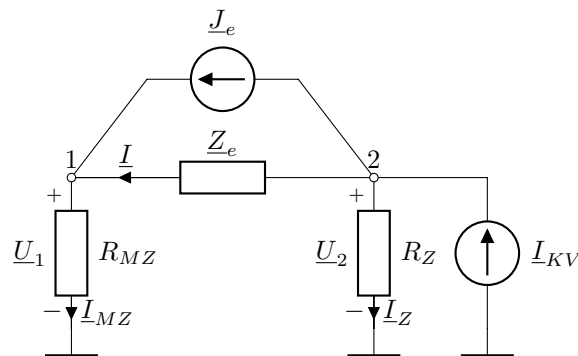
Матрицата \underline{E} на индуцираните е.м. сили во плаштовите, според (8.50), ќе биде

$$\begin{aligned}\underline{E} &= \begin{bmatrix} \underline{E}_1 & \underline{E}_2 & \underline{E}_3 \end{bmatrix}^T = \underline{I}_{KV} \cdot \begin{bmatrix} \underline{M}_s & \underline{M}_m & \underline{M}_m \end{bmatrix}^T = \\ &= \begin{bmatrix} (7,50 + j105,6) & (7,50 + j97,36) & (7,50 + j97,36) \end{bmatrix}^T \text{ V}.\end{aligned}$$

Параметрите \underline{Z}_e , \underline{J}_e и r_f ќе бидат

$$\begin{aligned}\underline{Z}_e &= \frac{\underline{Z}_s + 2 \cdot \underline{Z}_m}{3} = (0,1450 + j0,3337) = 0,3638 \cdot e^{j66,5^\circ} \Omega, \\ \underline{J}_e &= \frac{\underline{M}_s + 2 \cdot \underline{M}_m}{\underline{Z}_s + 2 \cdot \underline{Z}_m} \cdot \underline{I}_{KV} = (260,56 + j90,75) = 275,92 \cdot e^{j19,2^\circ} \text{ A}, \\ r_f &= 1 - \frac{\underline{M}_s + 2 \cdot \underline{M}_m}{\underline{Z}_s + 2 \cdot \underline{Z}_m} \equiv 1 - \frac{\underline{J}_e}{\underline{I}_{KV}} = \\ &= (0,1315 - j0,3025) = 0,3298 \cdot e^{-j66,5^\circ}.\end{aligned}$$

Останатиот дел од задачата ќе го решиме матрично, со примена на методот на јазлови потенцијали. За колото од сликата П.8.8.1 можеме да пишуваме



Слика П.8.8.1. Еквивалентно коло на заземјувачкиот систем

$$\begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/R_{MZ} + 1/\underline{Z}_e & -1/\underline{Z}_e \\ -1/\underline{Z}_e & 1/R_Z + 1/\underline{Z}_e \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \underline{J}_e \\ \underline{I}_{KV} - \underline{J}_e \end{bmatrix}$$

Решението на горниот систем равенки гласи

$$\begin{aligned}\underline{U}_1 &= (124,70 + j2,32) = 124,72 \cdot e^{j1,1^\circ} \text{ V}, \\ \underline{U}_2 &= (151,81 - j13,90) = 152,45 \cdot e^{-j5,2^\circ} \text{ V}.\end{aligned}$$

Сега, откако ги пресметавме напоните во јазлите, можеме да пристапиме кон пресметувањето на тековите на струи во колото.

Струите во заземјувачите од двете постројки ќе бидат

$$\begin{aligned}\underline{I}_{MZ} &= \underline{U}_1 / R_{MZ} = (249,40 + j4,63) = 249,44 \cdot e^{j1,1^\circ} \text{ A}, \\ \underline{I}_Z &= \underline{U}_2 / R_Z = (50,60 - j4,63) = 50,82 \cdot e^{-j5,2^\circ} \text{ A}.\end{aligned}$$

Останува уште со помош на (8.39) да се пресметаат струите $\underline{I} = [\underline{I}_1 \ \underline{I}_2 \ \underline{I}_3]^T$ во бакарните екрани од кабелските жили. За таа цел најнапред ќе го пресметаме векторот $\Delta \underline{U}$ од изразот (8.39).

Падот на напон на елементот \underline{Z}_e ќе биде

$$\Delta \underline{U} = \underline{U}_1 - \underline{U}_2 = (-27,117 + j16,214) \text{ V},$$

така што следува

$$\Delta \underline{U} = \begin{bmatrix} \Delta \underline{U}_1 & \Delta \underline{U}_2 & \Delta \underline{U}_3 \end{bmatrix}^T = (-27,117 + j16,214) \cdot \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}^T \text{ V}.$$

Конечно, врз основа на (8.34), за струите во бакарните екрани со насока од 1 кон 2 добиваме

$$\underline{I} = \underline{Z}^{-1} \cdot (\Delta \underline{U} - \underline{E})$$

или

$$\begin{bmatrix} \underline{I}_1 \\ \underline{I}_2 \\ \underline{I}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{Z}_s & \underline{Z}_m & \underline{Z}_m \\ \underline{Z}_m & \underline{Z}_s & \underline{Z}_m \\ \underline{Z}_m & \underline{Z}_m & \underline{Z}_s \end{bmatrix}^{-1} \cdot \left(\begin{bmatrix} \Delta \underline{U} \\ \Delta \underline{U} \\ \Delta \underline{U} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \underline{E}_1 \\ \underline{E}_2 \\ \underline{E}_3 \end{bmatrix} \right),$$

$$\begin{bmatrix} \underline{I}_1 \\ \underline{I}_2 \\ \underline{I}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -84,29 - j16,72 \\ -82,55 + j6,04 \\ -82,55 + j6,04 \end{bmatrix} \text{ A}.$$

Како проверка на решението може да ни послужи релацијата

$$\underline{I}_{MZ} + (\underline{I}_1 + \underline{I}_2 + \underline{I}_3) = 10^{-13} \cdot (-1,137 + j0,391) \approx 0.$$

која што произлегува од примената на I Кирхофов закон за струи за јазелот 1.

□ □ □

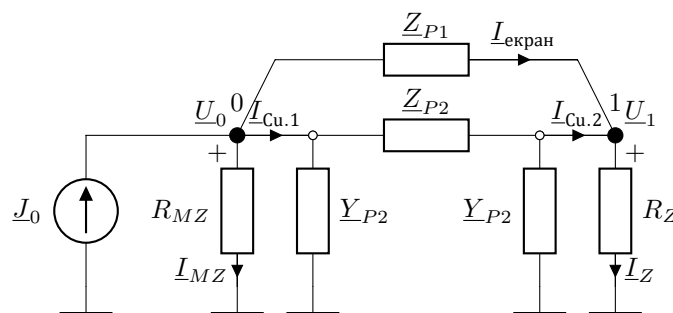
Пример 8.9. Заради подобрување на перформансите на заземјувачкиот систем, во кабелскиот ров од кабелот во примерот 8.6 се предвидува, на длабочина $h = 0,7$ m, да се постави бакарно јаже со пресек $S_{Cu} = 35$ mm² и пречник $d_{Cu} = 7,5$ mm. Обата краја од бакарното јаже се поврзуваат галвански за заземјувачите на крајните постројки. Струјата на доземен спој (струјата на еднофазна куса врска) настаната во постројката на ТС ВН/СН изнесува, како и во претходниот пример, $J_0 = 2315$ A. За новите услови на работа да се пресметаат

- а) напоните \underline{U}_0 и \underline{U}_1 на заземјувачите во ТС ВН/СН и ТС СН/НН;
- б) вкупната струја $\underline{I}_{\text{екран}}$ што се одведува преку електричните заштити на кабелскиот вод;
- в) струјата $\underline{I}_{Cu.1}$ на почетокот и струјата $\underline{I}_{Cu.2}$ на крајот од бакарното јаже.

Решение

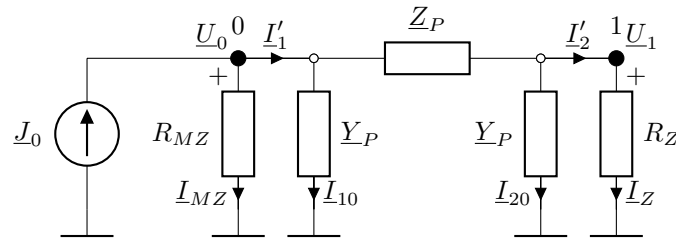
Во овој случај заземјувачкиот систем ќе се состои од два елемента: кабелот со своите електрични заштити на трите жили и бакарното јаже. Самото бакарно јаже ќе има двојна улога: 1) да одведува дел од струјата на грешка во земјата и 2) да спроведува струја од местото на грешката (неговиот почеток) кон соседниот заземјувач (неговиот крај).

Задачата ќе ја решиме на тој начин што секој од елементите на заземјувачкиот систем ќе го претставиме со неговата π -заменска шема, како што е тоа прикажано на сликите П.8.9.1 и П.8.9.2. Притоа заради упростување нема да го уважуваме присуството на заемната спрега помеѓу Си-јаже и електричните заштити на кабелските жили, иако таа не е воопшто занемарлива.



Слика П.8.9.1. Еквиваленто коло на заземјувачкиот систем

Параметрите на π -заменската шема на кабелот \underline{Z}_{P1} и \underline{Y}_{P1} се веќе пресметани во претходниот пример 8.6 и изнесуваат $\underline{Z}_{P1} = (0,145 + j0,334) \Omega$ и $\underline{Y}_{P1} = 0$.



Слика П.8.9.2. Упростено еквивалентно коло на заземјувачкиот систем

Параметрите \underline{Z}_{C2} , \underline{Z}_{P2} и \underline{Y}_{P2} од π -заменската шема на бакарното јаже ќе се пресметаат со постапка која што е идентична на онаа од примерот 8.1, применета на плаштот на кабелот. На тој начин се добива

$$\begin{aligned}\underline{Z}_{C2} &= (0,4654 + j0,2404) = 0,5238 \cdot e^{j27,3^\circ} \Omega; \\ \underline{Z}_{P2} &= (0,2559 + j0,4649) = 0,5307 \cdot e^{j61,2^\circ} \Omega; \\ \underline{Y}_{P2} &= (0,8500 - j0,0472) = 0,8513 \cdot e^{-j3,2^\circ} \text{ S}.\end{aligned}$$

Бидејќи двата четворокрајника се паралелно врзани, тие можат да се еквивалентираат со еден единствен, со параметри \underline{Z}_P и \underline{Y}_P , каде што е

$$\begin{aligned}\underline{Y}_P &= \underline{Y}_{P2} = (0,8500 - j0,0472) = 0,8513 \cdot e^{-j3,2^\circ} \text{ S}; \\ \underline{Z}_P &= \underline{Z}_{P1} \Pi \underline{Z}_{P2} = (0,145 + j0,334) \Pi (0,2559 + j0,4649) = \\ &= (0,0936 + j0,1949) = 0,2162 \cdot e^{j64,3^\circ} \Omega.\end{aligned}$$

За да го решиме електричното коло од сликата П.8.9.2 најнапред ќе ги пресметаме еквивалентите адмитанции \underline{Y}_1 и \underline{Y}_2 на почетокот и крајот од четворокрајникот

$$\begin{aligned}\underline{Y}_1 &= \underline{Y}_P + R_{MZ}^{-1} = (2,8500 - j0,0472) = 2,8504 \cdot e^{-j1,0^\circ} \text{ S}; \\ \underline{Y}_2 &= \underline{Y}_P + R_Z^{-1} = (1,1833 - j0,0472) = 1,1843 \cdot e^{-j2,3^\circ} \text{ S}.\end{aligned}$$

Сега можеме да ја пресметаме еквивалентната (влезната) импеданција во јазелот 0

$$\underline{Z}_{ek} = [\underline{Y}_1 + (\underline{Z}_P + 1/\underline{Y}_2)^{-1}]^{-1} = (0,2578 + j0,0196) = 0,2585 \cdot e^{j4,34^\circ} \Omega.$$

Ако позната струја на грешка \underline{J}_0 ја ставиме на фазната оска, т.е. усвоиме дека е $\underline{J}_0 = (2315 + j0) \text{ A}$ тогаш напонот \underline{U}_0 во јазелот 0 ќе биде

$$\underline{U}_0 = \underline{Z}_{ek} \cdot \underline{J}_0 = (596,8 + j45,3) = 598,48 \cdot e^{j4,34^\circ} \text{ V}.$$

Напонот во јазелот 1 ќе биде

$$\underline{U}_1 = \underline{U}_0 \cdot \frac{1/\underline{Y}_2}{\underline{Z}_P + 1/\underline{Y}_2} = \frac{\underline{U}_0}{1 + \underline{Z}_P \underline{Y}_2} = (519,82 - j64,53) = 523,82 \cdot e^{-j7,1^\circ} \text{ V.}$$

Струите во одделните елементи од заземјувачкиот систем ќе бидат

- струја на одведување од мрежестиот заземјувач во ТС ВН/СН

$$\underline{I}_{MZ} = \frac{\underline{U}_0}{R_{MZ}} = 1197,0 \cdot e^{j4,3^\circ} \text{ A}$$

- струја на одведување од заземјувачот на ТС СН/НН

$$\underline{I}_Z = \frac{\underline{U}_1}{R_Z} = 174,6 \cdot e^{-j7,1^\circ} \text{ A}$$

- вкупна струја на одведување преку електричната заштита на кабелот

$$\underline{I}_{\text{екран}} = \frac{\underline{U}_0 - \underline{U}_1}{\underline{Z}_{P1}} = 368,3 \cdot e^{-j11,6^\circ} \text{ A}$$

- струја на одведување на почетокот од бакарното јаже

$$\underline{I}_{\text{Cu.1}} = \underline{J}_0 - \underline{I} - \underline{I}_{MZ} = 760,8 \cdot e^{-j1,3^\circ} \text{ A}$$

- струја на одведување на крајот од бакарното јаже

$$\underline{I}_{\text{Cu.2}} = \underline{I}_Z - \underline{I} = 194,7 \cdot e^{j164,5^\circ} \text{ A}$$

Како доказа за точноста на решението ќе ја провериме важноста на следната релација

$$\underline{I}_{\text{екран}} + \underline{I}_{\text{Cu.1}} + \underline{I}_{MZ} = \underline{J}_0,$$

која што произлегува од I Кирхофов закон за јазелот 0. Со замена на бројните вредности се добива

$$(360,84 - j73,71) + (760,63 - j16,88) + (1193,5 + j90,61) = 2315 \equiv \underline{J}_0.$$

Забележуваме дека напонските прилики во заземјувачкиот систем во овој случај се значително подобри (намалени дури и за 40%) т.е. тие се поповолни во однос на случајот разгледуван во примерот 8.6 кога во кабелскиот ров немаше положено бакарно јаже заедно со кабелот. Во поглед на големината на струјата $\underline{I}_{\text{екран}}$ во електричната заштита на кабелот, што е битно да се оцени заради можноста од нејзино термичко преоптоварување и оштетување на изолацијата од кабелот, во последниов случај се добива нешто поголема (за околу 11%) вредност за оваа струја што значи дека електричната заштита нема да

биде значително термички пооптоварена. Интересно е да се напомене дека аргументот на струјата $\underline{I}_{Cu.2}$ на крајот од бакарното јаже изнесува 165° што значи дека вистинската насока на оваа струја е обратна од означената на сликата П.8.9.2. Тоа значи дека бакарното јаже со своето присуство извлекува струја на земјоспојот од заземјувачкиот систем не само од јазелот 0 (местото на грешката) туку и од јазелот 1, користејќи го притоа присуството на електричката заштита од кабелот.

Од резултатите добиени во примерите 8.6 и 8.7 можеме да го заклучиме следното. Каблите со изолиран метален плашт (електрична заштита) не претставуваат директни заземјувачи како што се, на пример, класичните кабли со неизолиран метален плашт (видете го примерот 8.1) и карактеристиките на заземјувачкиот систем со таквите кабли се неповолни. Со поставувањето на дополнителна заземјувачка електрода (бакарното јаже во случајов) во ровот, заедно со таквите кабли, се отстранува тој недостаток и значително се подобруваат перформансите на заземјувачкиот систем а опасностите од превисоките напони на допир и чекор се намалуваат. Тоа е всушност главната причина зошто во практиката, многу често, во ровот заедно со каблите со изолиран метален плашт, многу често се поставуваат уште и бакарни јажиња или поцинкувани челични ленти кои ја играат улогата на дополнителна електрода на заземјувачкиот систем.

□ □ □

Задача 8.2. Да се реши примерот 8.8 за случај кога Си-јаже не е галвански поврзано со заземјувачот на ТС СН/НН својот крај.

Напомена: Во овој случај бакарното јаже повторно се моделира со истиот π -образен четворопол $\underline{Y}_{P2}, \underline{Z}_{P2}, \underline{Y}_{P2}$ којшто е слободен на неговиот крај така што тој може да се третира како независен заземјувач којшто е поврзан паралелно со отпорноста R_{MZ} . Влезната импеданција на јажето, третирано како заземјувач ќе изнесува

$$\underline{Z}_{VL} = \left[\underline{Y}_{P2} + (\underline{Z}_{P2} + 1/\underline{Y}_{P2})^{-1} \right] = 0,6707 \cdot e^{j10,65^\circ} \Omega.$$

На тој начин проблемот ќе се решава исто како и во примерот 8.6, со таа разлика што наместо со R_{MZ} ќе се оперира со вредноста $\underline{Z}_{MZ} = R_{MZ} \parallel \underline{Z}_{VL} = 0,2877 \cdot e^{j4,55^\circ} \Omega$. Како решение се добиваат следните резултати

$$\underline{Z}_{ek} = 0,2673 \cdot e^{j4,67^\circ} \Omega; \quad \underline{U}_0 = 610,5 \cdot e^{j4,7^\circ} \text{ V}; \quad \underline{U}_1 = 597,1 \cdot e^{-j1,4^\circ} \text{ V};$$

$$\underline{I}_{MZ} = 2122 \cdot e^{-j0^\circ} \text{ A}; \quad \underline{I}_Z = 193 \cdot e^{-j1,4^\circ} \text{ A}; \quad \underline{I}_{Cu.1} = 910,1 \cdot e^{-j5,98^\circ} \text{ A};$$

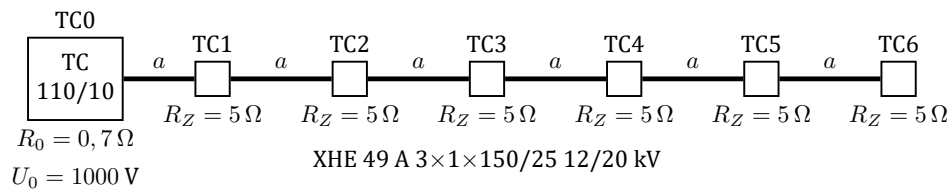
$$\underline{I}_{\text{екран}} = 193,0 \cdot e^{-j1,4^\circ} \text{ A}.$$

□ □ □

Пример 8.10. Еден 10 kV кабелски извод, изведен со кабел тип ХНЕ 49 А 3×1×150/25 12/20 kV, напојува $n = 6$ ТС СН/НН (слика П.8.10.1). Должината на кабелскиот извод изнесува $l = 3000$ m и може да се смета дека напојуваните 6 трафостаници се рамномерно распределени по неговата должина, на заемни растојанија $a = 500$ m, како што е тоа прикажано на сликата. Жилите на кабелот се сместени во кабелски ров на длабочина $h = 0,7$ m во формација триаголник. Останатите податоци за кабелот се исти со оние од примерот 8.5.

Секоја ТС СН/НН има сопствен заштитен заземјувач од типот 2/2 (конфигурација според сликата 6.4), и ги има следните карактеристики $\rho = 100 \Omega$; $R_Z = 5 \Omega$; $E_{d,max} = 7,0\%$; $E_{c,max} = 14\%$.

При еднофазна куса врска во ВН дел од напојната ТС 110/10 kV/kV потенцијалот на мрежестиот заземјувач достигнува вредност $U_0 = 1000$ V и преку металните делови од електричната заштита на кабелските жили се извезува и на заземјувачите од напојуваните ТС СН/НН. Да се пресметаат потенцијалите \underline{U}_k ($k = 1, 2, \dots, n$) што ги примаат заштитните заземјувачи на ТС СН/НН во изводот како и реалните опасности од појава на опасни напони на допир и чекор. Времето на исклучување на кусата врска изнесува $t = 0,5$ s.



Слика П.8.10.1. 10 kV кабелски извод со шест ТС СН/НН

Решение

Во случајов кабелскиот извод можеме да го третираме како каскада од $n = 6$ четворополи со идентични карактеристики и за неговото решавање да го примениме моделот изложен во точката 8.3.1 од учебникот. Врз основа на изразите (8.23) можеме да пишуваме

$$\begin{aligned} \underline{U}_0 &= \underline{U}_n \cdot \text{ch}(ng) + \underline{Z}_C \cdot \underline{I}_n \cdot \text{sh}(ng), \\ \underline{I}_0 &= \frac{\underline{U}_n}{\underline{Z}_C} \cdot \text{sh}(ng) + \underline{I}_n \cdot \text{ch}(ng). \end{aligned}$$

каде што, во согласност со сликата П.8.10.1 и релациите (8.24) и (8.25) имаме

$$\underline{Z} = \underline{z} \cdot a = (0,145 + j0,334) \Omega \text{ (видете го примерот 8.6);}$$

$$\frac{\underline{Z}}{2R_Z} = \underline{\lambda} = \frac{0,145 + j0,334}{10} = (0,0145 + j0,0344) = 0,0364 \cdot e^{j66,5^\circ};$$

$$\underline{g} = \ln \left(1 + \underline{\lambda} + \sqrt{2 \cdot \underline{\lambda} + \underline{\lambda}^2} \right) = (0,2258 + j0,1472) = 0,2695 \cdot e^{j33,1^\circ};$$

$$\underline{Z}_C = \frac{\underline{Z}}{\sqrt{2 \cdot \underline{\lambda} + \underline{\lambda}^2}} = (1,1301 + j0,7281) = 1,3443 \cdot e^{j32,8^\circ} \Omega.$$

$$e^{ng} = (2,4592 + j2,9950) = 3,8753 \cdot e^{j50,6^\circ};$$

$$e^{-ng} = (0,1638 - j0,1994) = 0,2580 \cdot e^{-j50,6^\circ};$$

$$\text{ch}(ng) = \frac{e^{ng} + e^{-ng}}{2} = (1,3115 + j1,3978) = 1,9167 \cdot e^{j46,8^\circ};$$

$$\text{sh}(ng) = \frac{e^{ng} - e^{-ng}}{2} = (1,1477 + j1,5972) = 1,9668 \cdot e^{j54,3^\circ}.$$

Напонот на крајот од изводот \underline{U}_n се пресметува со помош на релацијата (8.28)

$$\underline{U}_n = \frac{\underline{U}_0}{\text{ch}ng + \frac{\underline{Z}}{2R_Z} \cdot \text{sh}ng} = (293,4 - j367,9) = 470,5 \cdot e^{-j0,51^\circ} \text{ V},$$

додека напоните во преостанатите јазли од колото на заземјувачкиот систем се добиваат со помош на равенката (8.29)

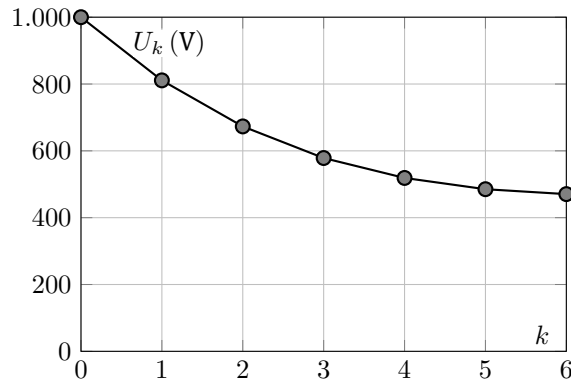
$$\underline{U}_k = \underline{U}_n \cdot \left[\text{ch}(n-k)g + \frac{\underline{Z}}{2R_Z} \cdot \text{sh}(n-k)g \right], \quad k = 1, 2, \dots, n-1.$$

На тој начин за напоните ќе ги добиеме следните вредности во (V)

Табела П.8.10.1. Распределба на напоните на заземјувачите по поедините ТС СН/НН

\underline{U}_0	\underline{U}_1	\underline{U}_2	\underline{U}_3
$1000 \cdot e^{j0^\circ}$	$810,9 \cdot e^{-j13,5^\circ}$	$673,1 \cdot e^{-j21,0^\circ}$	$578,5 \cdot e^{-j31,5^\circ}$
	\underline{U}_4	\underline{U}_5	\underline{U}_6
	$518,9 \cdot e^{-j40,8^\circ}$	$485,2 \cdot e^{-j47,7^\circ}$	$470,5 \cdot e^{-j51,4^\circ}$

Распределбата на напоните на заземјувачите од ТС СН/НН по должината на изводот се прикажани на сликата П.8.10.2.



Слика П.8.10.2. Распределба на напоните на заземјувачите во поедините ТС СН/НН по должината на изводот

Сега може, со помош на изразот (8.31), да се пресмета и струјата \underline{I}_0 која што се изнесува од заземјувачкиот систем на кабелскиот извод и која што е наедно и вкупна струја во трите метални плаштови од неговата прва делница

$$\underline{I}_0 = \frac{U_0 - U_1}{Z_1} = (586,5 - j350,7) = 683,3 \cdot e^{-j30,9^\circ} \text{ A.}$$

а потоа и влезната импеданција Z_{vl} на заземјувачкиот систем од самиот извод

$$Z_{vl} = \frac{U_0}{\underline{I}_0} = (1,256 + j0,751) = 1,463 \cdot e^{j30,9^\circ} \Omega.$$

Според нашите прописи, за времетраење на струјниот удар (грешката) од $t = 0,5 \text{ s}$, дозволениот напон на допир односно чекор изнесува $U_{d,doz} = U_{c,doz} = 80 \text{ V}$.

Кај првата ТС СН/НН, означена како ТС1, напонот за време на грешката изнесува $U_1 = 810,9 \text{ V}$. Бидејќи максималната потенцијална разлика на чекор за нејзиниот заземјувач изнесува $E_{c,max} = 14\%$, ќе добиеме дека е $E_{c,max} = 0,14 \cdot U_1 = 0,14 \cdot 810,9 = 113,5 \text{ V}$. Имајќи предвид дека специфичната отпорност на тлото изнесува $\rho = 125 \Omega\text{m}$, за факторот на чекор s_c како и за најголемиот напон на чекор ќе добиеме

$$s_c = 1 + 6 \cdot \frac{\rho}{1000} = 1 + 6 \cdot \frac{125}{1000} = 1,75;$$

$$U_{c,max} = \frac{E_{c,max}}{s_c} = \frac{113,5}{1,75} = 64,9 < 80 \text{ V}.$$

Значи реална опасност од превисок напон на чекор кај оваа трафостаница нема. Кај преостанатите ТС СН/НН, со оглед на напоните

на нивните заземјувачи (табела П.8.10.1), исто така нема да има таква опасност.

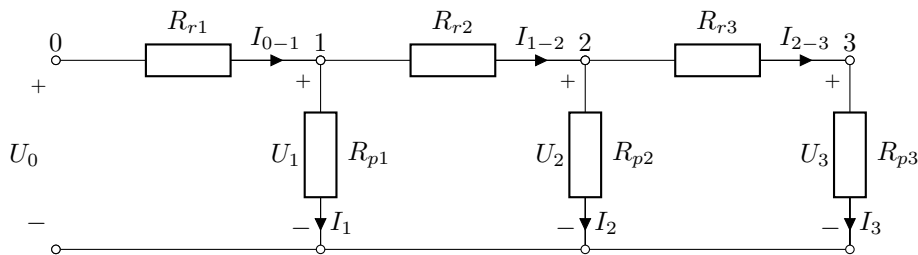
Проверка по напоните на допир кај поедините ТС СН/НН нема потреба да се прави бидејќи, според карактеристиките на нивните заземјувачи, како што е нагласено во задачата, најголемата потенцијална разлика на допир изнесува 7,1% од напоните на заземјувачите, а тоа е двојно помалку од соодветните вредности на $E_{c,max}$.

□ □ □

Пример 8.11. Да се реши примерот 8.10 со постапката за решавање на електрични кола во форма на скала.

Решение

Постапката за решавање на електрично коло во форма на скала ќе ја илустрираме преку следното коло за кое се познати $U_0 = 100\text{ V}$, $R_{r1} = R_{r2} = R_{r3} = 2\ \Omega$ и $R_{p1} = R_{p2} = R_{p3} = 1\ \Omega$. Во колото е потребно да се определат потенцијалите на јазлите 1, 2 и 3.



Слика П.8.11.1. Електрично коло во форма на скала

Колото го решаваме од десно кон лево, при што ќе претпоставиме дека е

$$I_3 = 1\text{ A},$$

со што можеме да го пресметаме потенцијалот на јазелот 3

$$U_3 = R_{p3} \cdot I_3 = 1\text{ V}.$$

Понатаму користејќи ги Кирхофовите закони, обработувајќи една гранка и јазел лево од последно обработениот јазел, можеме да напишеме

Гранка 2-3

$$I_{2-3} = I_3 = 1\text{ A};$$

$$U_2 = U_3 + R_{r3} \cdot I_{2-3} = 1 + 2 \cdot 1 = 3\text{ V};$$

$$I_2 = U_2 / R_{p2} = 3 / 1 = 3\text{ A}.$$

Гранка 1-2

$$\begin{aligned}I_{1-2} &= I_2 + I_{2-3} = 3 + 1 = 4 \text{ A}; \\U_1 &= U_2 + R_{r2} \cdot I_{1-2} = 3 + 2 \cdot 4 = 11 \text{ V}; \\I_1 &= U_1/R_{p1} = 11/1 = 11 \text{ A}.\end{aligned}$$

Гранка 0-1

$$\begin{aligned}I_{0-1} &= I_1 + I_{1-2} = 11 + 4 = 15 \text{ A}; \\U_0 &= U_1 + R_{r1} \cdot I_{0-1} = 11 + 2 \cdot 15 = 41 \text{ V}.\end{aligned}$$

Според тоа нашата претпоставка дека струјата во последниот отпорник е $I_3 = 1 \text{ A}$ не е точна бидејќи не добивме $U_0 = 100 \text{ V}$, при што сме направиле грешка во пресметките за $100/41 = 2,439$ пати. Бидејќи колото е линеарно точните резултати за сите величини, при $U_0 = 100 \text{ V}$, ќе ги добиеме ако претпоставените ги помножиме со 2,439 со што за бараните потенцијали можеме да напишеме

$$\begin{aligned}U_0 &= 100/41 \cdot 41 = 100 \text{ V}; \\U_1 &= 100/41 \cdot 11 = 26,8293 \text{ V}; \\U_2 &= 100/41 \cdot 3 = 7,3171 \text{ V}; \\U_3 &= 100/41 \cdot 1 = 2,4390 \text{ V}.\end{aligned}$$

Множејќи ги и струите со истиот коефициент ги добиваме следните вредности

$$\begin{aligned}I_1 &= 26,8293 \text{ A}; & I_{0-1} &= 36,5854 \text{ A}; \\I_2 &= 7,3171 \text{ A}; & I_{1-2} &= 9,7561 \text{ A}; \\I_3 &= 2,4390 \text{ A}; & I_{2-3} &= 2,4390 \text{ A}.\end{aligned}$$

На крајот, ќе наведеме дека од добиените резултати можеме да ја пресметаме и влезната отпорност во колото која изнесува

$$R_{vl} = \frac{U_0}{I_{0-1}} = \frac{100}{36,5854} = 2,7333 \Omega.$$

Пред да ја примениме наведената постапка на кабелскиот извод, неговите податоци ќе ги запишеме во една m-датотека во форма на функција.

programi/kabli/kabel_11.m

```
1 function kabel = kabel_11()
2 kabel.U0 = 1000;
3 kabel.Rz = 5*ones(6,1);
4 kabel.Zr = (0.145 + 1j*0.334)*ones(6,1);
```

Функцијата `kabel_8` ја враќа структурата `kabel` која што има 3 полиња: `kabel.U0` каде е зададен напонот на почетокот на кабелскиот извод, `kabel.Rz` кој е вектор со n елементи во кои се зададени отпорностите на заземјувачите кај n -те трафостаници и `kabel.Zr` кој е вектор со n елементи во кои се зададени импеданциите на n -те делници помеѓу трафостаниците.

Постапката за решавање на електрично коло во форма на скала е напишана во функцијата `skala`. Таа за влезен параметар ја има променливата `datoteka` во која е дадено името на датотека со податоците за кабелот, а како излез од функцијата се добиваат векторот со потенцијалите на сите трафостаници `U`, векторот со струи во пластовите на каблите `Ir` и векторот со струи во заземјувачите на трафостаниците `I`. Кодот во функцијата `skala` во потполност ја следи претходно наведената постапка за решавање на колото.

Програма 8.2. Решавање на електрично коло во форма на скала (programi/kabli/skala.m)

```
1 function [U, Ir, Iz] = skala(datoteka)
2 K = feval(datoteka);
3 [U0,Rz,Zr] = deal(K.U0,K.Rz,K.Zr);
4 n =length(Rz);
5 Iz(n,1) = 1;
6 Ir(n,1) = 1;
7 U(n,1) = Rz(n)*Iz(n);
8 for i = n-1:-1:1
9     U(i) = U(i+1) + Zr(i)*Ir(i+1);
10    Iz(i) = U(i)/Rz(i);
11    Ir(i) = Ir(i+1) + Iz(i);
12 end
13 U0_presm = U(1) + Zr(1)*Ir(1);
14 k = U0/U0_presm;
15 U = k*U;
16 Ir = k*Ir;
17 Iz = k* Iz;
```

Решението на колото го добиваме на следниот начин

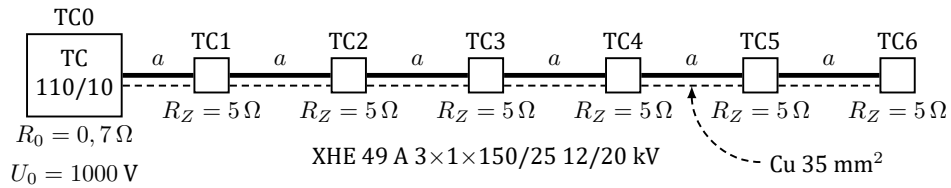
```
>> [U, Ir, Iz] = skala('kabel_11');
>> U = abs(U)
U =
810.9036
673.0965
578.4978
518.7252
485.1763
470.5123
```

додека влезната импеданција на заземјувачкиот систем на кабелскиот извод е

```
>> Zvl = 1000/Ir(1)
Zvl =
1.2560 + 0.7510i
```

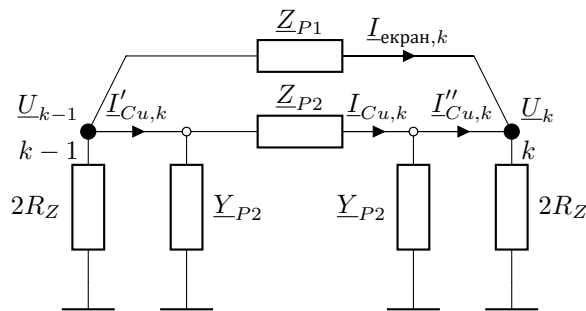


Пример 8.12. Пресметките на извоз на потенцијалот за примерот 8.9 да се повторат и за случајот кога во кабелскиот ров, по целата негова должина, заедно со трите жили од кабелот тип ХНЕ 49 А 3×1×150/25 12/20 kV, постои и бакарно јаже, положено на длабочина $h = 0,7$ м.

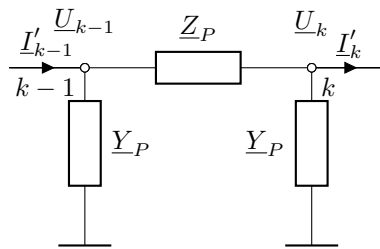


Слика П.8.12.1. 10 kV кабелски извод со шест ТС СН/НН и положено бакарно јаже $\text{Cu } 35 \text{ mm}^2$

Решение



Слика П.8.12.2. π -четворопол на кабелскиот извод



Слика П.8.12.3. Еквивалент на π -четворополот од сликата П.8.12.2

Во овој случај заменската шема на секоја секција од заземјувачкиот систем, освен првата и последната, слично како и во примерот 8.8, ќе се состои од по еден симетричен π -четворопол со кој ќе

биде опфатена паралелната комбинација трите кабелски екрани плус бакарното јаже како заземјувачка електрода (слика П.8.12.2). Тој еквивалентен π -четворокрајник ќе претставува паралелна комбинација од два симетрични четворопола. Првиот четворопол со параметри $(\underline{Y}_{P1}, \underline{Z}_{P1}, \underline{Y}_{P1})$ со кој што се моделира кабелската делница ќе ги има следните параметри

$$\begin{aligned} z_1 &= (0, 29 + j0, 668) \Omega/\text{km} \quad (\text{видете го примерот 8.8}); \\ \underline{Z}_{P1} &= z_1 \cdot a = (0, 145 + j, 0, 334) \Omega; \\ \underline{Y}_{P1} &= 1/(2R_Z) = 1/(2 \cdot 5) = 0, 1 \text{ S}. \end{aligned}$$

Вториот четворопол со којшто се моделира бакарното јаже во делницата ќе има параметри $(\underline{Y}_{P2}, \underline{Z}_{P2}, \underline{Y}_{P2})$. Неговите параметри се пресметуваат со помош на релациите (8.1) ÷ (8.10), на следниот начин

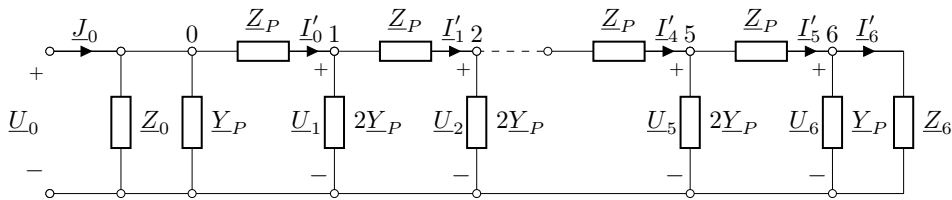
$$\begin{aligned} r_{Cu} &= \frac{1000}{\kappa_{Cu} \cdot S_{Cu}} = \frac{1000 \cdot \rho_{Cu}}{S_{Cu}} = \frac{18}{35} = 0, 5143 \frac{\Omega}{\text{km}}; \\ r_2 &= r_z + r_{Cu} = 0, 05 + 0, 5143 = 0, 5643 \frac{\Omega}{\text{km}}; \\ D_e &= 658 \cdot \sqrt{\rho/f} = 658 \cdot \sqrt{100/50} = 930, 6 \text{ m}; \\ x_2 &= 0, 1445 \cdot \log \frac{D_e}{d_{Cu}/2} + 0, 0157 \cdot \mu_r = \\ &= 0, 1445 \cdot \log \frac{930, 6}{0, 0375} + 0, 0157 = 0, 7951 \frac{\Omega}{\text{km}}; \\ z_2 &= r_2 + jx_2 = (0, 5643 + j0, 7952) = 0, 9751 \cdot e^{j54,64^\circ} \frac{\Omega}{\text{km}}; \\ \underline{Z}_2 &= z_2 \cdot a = (0, 564 + j0, 795) \cdot 0, 5 = (0, 282 + j0, 348) \Omega; \\ \underline{y}_2 &= g_2 + j0 = \frac{1000 \cdot \pi}{\rho \cdot \ln(a/\sqrt{h \cdot d_{Cu}})} = 3, 5541 \frac{\text{S}}{\text{km}}; \\ \underline{\gamma} &= \sqrt{z \cdot \underline{y}} = \sqrt{(r + jx) \cdot g} = (1, 6540 + j0, 8544) 1/\text{km}; \\ \underline{Z}_{C2} &= \sqrt{\underline{Z}_2/\underline{Y}_2} = \sqrt{z_2/\underline{y}_2} = (0, 4654 + j0, 2404) \Omega; \\ \underline{Z}_{P2} &= \underline{Z}_C \cdot \text{sh} \underline{\gamma} a = (0, 2559 + j0, 4649) \Omega; \\ \underline{Y}_{P2} &= \frac{\text{ch} \underline{\gamma} a - 1}{\underline{Z}_C \cdot \text{sh} \underline{\gamma} a} = (0, 8500 - j0, 0472) \text{ S}. \end{aligned}$$

Параметрите \underline{Z}_P и \underline{Y}_P на еквивалентниот четворопол $(\underline{Y}_P, \underline{Z}_P, \underline{Y}_P)$ ќе бидат

$$\begin{aligned} \underline{Z}_P &= \underline{Z}_{P1} \parallel \underline{Z}_{P2} = \underline{Z}_{P1} \cdot \underline{Z}_{P2}/(\underline{Z}_{P1} + \underline{Z}_{P2}) = (0, 0936 + j0, 1948) \Omega, \\ \underline{Y}_P &= \underline{Y}_{P1} + \underline{Y}_{P2} = (0, 9500 - j0, 0472) \text{ S}. \end{aligned}$$

Понатаму, првиот и последниот четворопол, коишто се разликуваат од останатите, ќе ги направиме на вештачки начин да бидат симетрични така што ќе ги надополниме со две нови импеданции; првиот со импеданцијата $2R_z$, приклучена во јазелот 0, додека последниот четворопол со импеданцијата $-2R_z$, приклучена во јазелот 6. На тој начин тие ќе станат идентични со преостанатите четворополи, т.е. ќе формираме каскада од $n = 6$ идентични, симетрични, четворополи.

Но за да не биде нарушена состојбата (распределбата на струи и напони) во заземјувачкиот систем, на почетокот и на крајот од каскадата од 6 четворополи ќе ги додадеме истите тие импеданции но со обратен знак: $Z_0 = -2R_z$ на почетокот и $Z_6 = 2R_z$ на крајот, како што е тоа прикажано на сликата П.8.12.4.



Слика П.8.12.4. Приказ на заземјувачкиот систем на кабелскиот извод како каскада од 6 четворополи, дополнета со фиктивните импеданции Z_0 и Z_6

За решавањето на приликите во заземјувачкиот систем од сликата П.8.12.4, ќе го примениме моделот од точка 8.3.1. Најнапред, со помош на релациите (8.24) и (8.25) ќе ги пресметаме параметрите и на каскадата од 6 четворополи

$$\lambda = \underline{Z}_P / \underline{Y}_P^{-1} = \underline{Z}_P \cdot \underline{Y}_P = (0,0981 + j0,1806) = 0,2055 \cdot e^{j61,5^\circ};$$

$$\underline{g} = \ln \left[1 + \lambda + \sqrt{2 \cdot \lambda + \lambda^2} \right] = 0,5510 + j0,3170 = 0,6357 \cdot e^{j29,9^\circ};$$

$$\underline{Z} = \frac{\underline{Z}_P}{\sqrt{2 \cdot \lambda + \lambda^2}} = (0,2811 + j0,1698) = 0,3284 \cdot e^{j31,3^\circ} \Omega;$$

$$\text{ch}(n\underline{g}) = (-0,0444 + j12,88);$$

$$\text{sh}(n\underline{g}) = (-0,0443 + j12,91).$$

Сега, со помош на релацијата (8.28) ќе го пресметаме напонот $\underline{U}_n = \underline{U}_6$ на крајот од изводот

$$\underline{U}_n = \frac{\underline{U}_0}{\text{ch}n\underline{g} + \frac{\underline{Z}}{\underline{Z}_6} \cdot \text{sh}n\underline{g}} = (-24,39 - j67,08) = 71,38 \cdot e^{-j110^\circ} \text{ V},$$

а потоа, со помош на релацијата (8.29) и напоните во преостанатите јазли

$$\underline{U}_k = \underline{U}_n \cdot \left[\operatorname{ch}(n-k) \underline{g} + \frac{\underline{Z}}{\underline{Z}_6} \cdot \operatorname{sh}(n-k) \cdot \underline{g} \right], \quad k = 1, 2, \dots, n-1.$$

На тој начин, за напоните во преостанатите јазли од колото се добиваат резултати прикажани во следната табела.

Табела П.8.12.1. Распределба на напоните (V) во одделните јазли од заземјувачкиот систем

\underline{U}_0	\underline{U}_1	\underline{U}_2	\underline{U}_3
$1000 \cdot e^{j0^\circ}$	$574,7 \cdot e^{-j18,2^\circ}$	$329,3 \cdot e^{-j36,7^\circ}$	$189,4 \cdot e^{-j56,4^\circ}$
	\underline{U}_4	\underline{U}_5	\underline{U}_6
	$114,1 \cdot e^{-j78,3^\circ}$	$80,3 \cdot e^{-j99,7^\circ}$	$71,4 \cdot e^{-j110^\circ}$

Сега можеме да ги пресметаме и струите во гранките од колото на заземјувачкиот систем. Струите $\underline{I}'_0, \underline{I}'_1, \underline{I}'_2, \dots, \underline{I}'_6$ што фигурираат во колото од сликата П.8.12.4 се фиктивни струи што произлегуваат од моделот и се однесуваат на целата комбинација составена од Си-плаштови на жилите и Си-јаже. Затоа тие не се од интерес во нашите анализи. Од интерес се струите во првата делница ($k = 1$) и тоа $\underline{I}_{\text{екран},1}, \underline{I}'_{Cu,1}, \underline{I}''_{Cu,1}$ (слика П.8.12.2) како и вкупната струја \underline{J}_0 што истекува преку заземјувачкиот систем. Тие се пресметуваат со примена на двата Кирхофови закона, со помош на следните релации

$$\begin{aligned} \underline{I}_{\text{екран},1} &= \frac{\underline{U}_0 - \underline{U}_1}{Z_{P1}} = \frac{454,0 + j179,5}{0,145 + j0,334} = (949,8 - j947,9) = \\ &= 1341,9 \cdot e^{-j44,9^\circ} \text{ A}; \end{aligned}$$

$$\underline{I}'_{Cu,1} = \frac{\underline{U}_0 - \underline{U}_1}{Z_{P2}} + \underline{Y}_{P2} \cdot \underline{U}_0 = (1558,9 - j633,6) = 1682,7 \cdot e^{-j22,3^\circ} \text{ A};$$

$$\underline{I}''_{Cu,1} = \frac{\underline{U}_0 - \underline{U}_1}{Z_{P2}} - \underline{Y}_{P2} \cdot \underline{U}_1 = (253,9 - j408,0) = 480,3 \cdot e^{-j58,2^\circ} \text{ A}.$$

На сличен начин може да се пресметаат струите $\underline{I}_{\text{екран}}, \underline{I}'_{Cu}, \underline{I}''_{Cu}$ и во преостанатите делници од изводот. За илустрација, пресметаните вредности за вкупните струи во бакарните екрани од кабелските делници $\underline{I}_{\text{екран}}$ се прикажани во следната табела.

Вкупната струја на одведување од заземјувачкиот систем на изводот \underline{J}_0 ќе биде

$$\underline{J}_0 = \underline{I}_{\text{екран},1} + \underline{I}'_{Cu,1} = (2508,7 - j1581,5) = 2965,6 \cdot e^{-j32,2^\circ} \text{ A},$$

Табела П.8.12.2. Струи во плаштовите (А) во одделните делници од заземјувачкиот систем

\underline{J}_0	$\underline{I}_{\text{екран,1}}$	$\underline{I}_{\text{екран,2}}$	$\underline{I}_{\text{екран,3}}$
$2965,6 \cdot e^{-j32,2^\circ}$	$1341,9 \cdot e^{-j44,9^\circ}$	$776,8 \cdot e^{-j63,0^\circ}$	$450,5 \cdot e^{-j80,3^\circ}$
	$\underline{I}_{\text{екран,4}}$	$\underline{I}_{\text{екран,5}}$	$\underline{I}_{\text{екран,6}}$
	$257,6 \cdot e^{-j96,0^\circ}$	$134,9 \cdot e^{-j108,0^\circ}$	$44,6 \cdot e^{-j114,7^\circ}$

додека неговата влезна импеданција \underline{Z}_0 ќе биде

$$\underline{Z}_0 = \frac{\underline{U}_0}{\underline{J}_0} = \frac{1000}{2508,7 - j1581,5} = (0,2852 + j0,1798) = 0,3372 \cdot e^{j32,2^\circ} \Omega.$$

Таа може да се добие и на друг начин, со помош на релациите (8.33). Проверките покажуваат дека на тој начин повторно се добива истиот резултат.

Од распределбата на напоните на одделините заземјувачи на ТС СН/НН по должината на изводот јасно се гледа дека тие се помали во однос на нивните вредности што би се имале кога отсуствува бакарното јаже.

Имајќи ги предвид анализите извршени во примерот 8.9, сосема е јасно дека опасности од превисоки напони на допир и чекор во околината на ТС СН/НН нема да постојат.

Примерот можеме да го решиме и со примена на методот на јазлови потенцијали кој е даден со следниот матричен систем равенки

$$\underline{Y} \cdot \underline{U} = \underline{I},$$

каде што, во согласност со колото од сликата П.8.12.4, за елементите на матрицата \underline{Y} важи

$$\underline{Y}_{ii} = 2\underline{Y}_P + \frac{2}{\underline{Z}_P}, \quad i = 1, 2, \dots, 5,$$

$$\underline{Y}_{66} = \underline{Y}_P + \frac{1}{\underline{Z}_P} + \frac{1}{2R_Z},$$

$$\underline{Y}_{ij} = -\frac{1}{\underline{Z}_P}, \quad i, j = 1, 2, \dots, 6; \quad i \neq j,$$

а инјектирана струја има само во јазелот 1 и нејзината вредност е

$$\underline{I}_1 = \frac{\underline{U}_0}{\underline{Z}_P}.$$

Според погоре наведеното, еквивалентото коло можеме да го решиме со следната програма

programi/kabli/primer_12.m

```

1 U0 = 1000;
2 Zp = 0.0936 + 1j*0.1948;
3 Yp = 0.95 - 1j*0.0472;
4 Rz = 5;
5 n = 6;
6 Y = (2*Yp + 2/Zp)*eye(n) ...
7 + diag(-1/Zp*ones(n-1,1),1) ...
8 + diag(-1/Zp*ones(n-1,1),-1);
9 Y(n,n) = Yp + 1/Zp + 1/(2*Rz);
10 I = zeros(n,1);
11 I(1) = U0/Zp;
12 U = Y\I;
    
```

со што добиваме

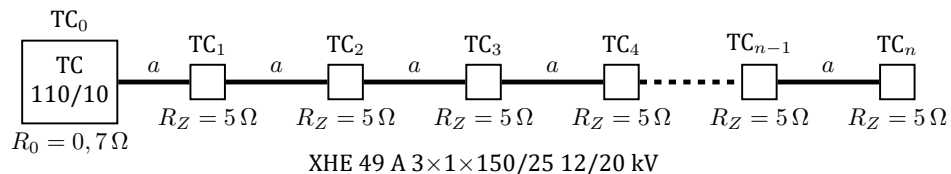
```

>> primer_12
>> abs(U)
ans =
574.6922
329.2692
189.3479
114.0345
80.2963
71.3485
    
```



Пример 8.13. Се посматра 10 kV кабелски извод, изведен со кабел тип ХНЕ 49 А 3×1×150/25 12/20 kV, Кабелот напојува во општ случај n идентични ТС СН/НН распределени на еднакви меѓусебни растојанија $a = 500$ m, според сликата П.8.13.1. Вкупната должина на кабелскиот извод изнесува $l = n \cdot a$. Жилите на кабелот се сместени во кабелски ров на длабочина $h = 0,7$ m во формација триаголник. Останатите податоци за кабелот се исти со оние од примерот 8.5.

Да се изврши анализа на зависноста на влезната импеданција на изводот $Z_{vl}(n)$ како и распределбата на коефициентот на изнесениот потенцијал $k_i(k)$ ($k = 1, 2, \dots, n$), за разни вредности на бројот n на напојуваните ТС СН/НН. Резултатите да се прикажат табеларно и графички.



Слика П.8.13.1. Општ случај на 10 kV кабелски извод што напојува n ТС СН/НН

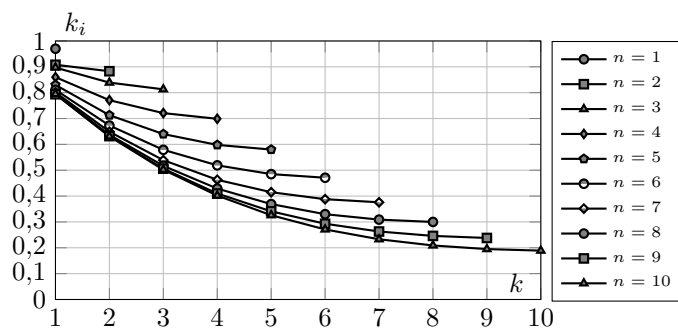
Решение

На начин наполно ист како во примерот 8.9, се вршат пресметки на влезната импеданција Z_{vl} на кабелскиот извод посматран како елемент од заземјувачкиот систем – каскада од вкупно n -четворокрајници. Истовремено, се вршат и пресметки на коефициентите k_i ($k = 1, 2, \dots, n$) на изнесениот потенцијал по должината на изводот. Овие пресметки се прават повеќе пати, за разни вредности на бројот n на напојуваните ТС СН/НН.

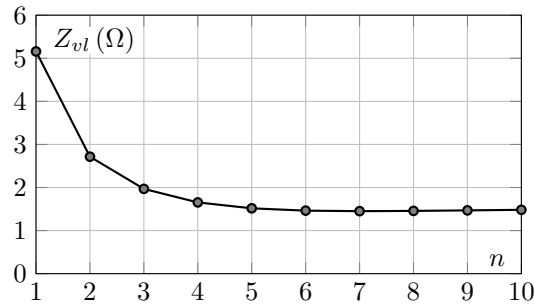
Резултатите од ваквата параметарска анализа се сместени во табелата П.8.13.1 и сликите П.8.13.2 и П.8.13.3.

Табела П.8.13.1. Табеларен приказ на резултатите од пресметките

n	Z_{vl} (Ω)	Коефициент на изнесениот потенцијал по должината на изводот $k_i(k)$									
		$k = 1$	$k = 2$	$k = 3$	$k = 4$	$k = 5$	$k = 6$	$k = 7$	$k = 8$	$k = 9$	$k = 10$
1	5,158	0,970	/								
2	2,715	0,908	0,883	/							
3	1,968	0,897	0,839	0,813	/						
4	1,654	0,860	0,771	0,721	0,699	/					
5	1,517	0,830	0,713	0,640	0,598	0,580	/				
6	1,463	0,811	0,673	0,579	0,519	0,485	0,471	/			
7	1,451	0,801	0,649	0,539	0,463	0,415	0,388	0,376	/		
8	1,457	0,796	0,637	0,517	0,429	0,369	0,330	0,309	0,300	/	
9	1,469	0,794	0,632	0,506	0,410	0,341	0,293	0,263	0,246	0,238	/
10	1,482	0,795	0,631	0,502	0,402	0,326	0,271	0,233	0,209	0,195	0,189



Слика П.8.13.2. Распределба на коефициентот k_i по должината на изводот во зависност од бројот n на напојуваните ТС СН/НН



Слика П.8.13.3. Зависност на влезната импеданција на изводот од бројот на ТС СН/НН

□ □ □

Задача 8.3. Се посматра 10 kV кабелски извод од примерот 8.11 којшто е сега изведен со класичен кабел тип IPO 13 A 3×150 6/10 kV, Кабелот напојува во општ случај n идентични ТС СН/НН распределени на еднакви меѓусебни растојанија $a = 500$ m, така што вкупната должина на кабелскиот извод изнесува $l = n \cdot a$. Кабелот е закопан во кабелски ров на длабочина $h = 0,7$ m при што специфичната опторност на тлото изнесува $\rho = 100 \Omega\text{m}$.

Да се повтори параметарската анализа на зависноста на влезната импеданција на изводот $Z_{vl}(n)$ како и распределбата на коефициентот на изнесениот потенцијал k_i ($k = 1, 2, \dots, n$) за разни вредности на бројот n на напојуваните ТС СН/НН и во овој случај. Резултатите да се прикажат табеларно.

Решение

Табела 3.8.3.1. Табеларен приказ на резултатите од пресметките

n	Z _{vl} (Ω)	Распределба на коефициентот $k_i(k)$				
		k = 1	k = 2	k = 3	k = 4	k = 5
1	0,703	0,557	/			
2	0,720	0,286	0,160	/		
3	0,729	0,288	0,082	0,017	/	
4	0,729	0,290	0,083	0,024	0,013	/
5	0,729	0,290	0,084	0,024	0,007	0,004

□ □ □

9

АНАЛИЗА НА СЛОЖЕНИ ЗАЗЕМЈУВАЧКИ СИСТЕМИ

9.1 Општо

Заземјувачкиот систем (ЗС) на една мрежа го сочинуваат сите заземјувачи на одделните електроенергетски објекти (електрични централи, разводни постројки, трансформаторски станици и др.) како и сите надземни водови и електроенергетски кабли кои со своите заземјувачки системи вршат нивно галванско поврзување. Како што беше во претходниот дел нагласено заземјувачкиот систем на мрежата има задача да ги исполни следните основни функции:

- за најнеповолните услови на земјоспој односно еднофазна куса врска во постројката или пак во мрежата да го обезбедат бараното ниво на сигурност на луѓето од опасни напони на допир и чекор во и надвор од оградата на одделните електроенергетски објекти;
- да обезбедат сигурно дејствување на заштитата од струите на грешка и да ја спречат можноста за оштетување на опремата, појава на пожар и други видови штети и
- да обезбедат ефикасна работа на неутралната точка на ЕЕС како во нормални услови на работа така и во услови на грешка.

За да се оцени дали еден ЗС ги исполнува горенаведените функции потребно е да се реши еквивалентното коло (т.е. моделот) на заземјувачкиот систем во режимот на земјоспој. Под решавање на ЗС се подразбира пресметување на струите во гранките и потенцијалите во јазлите од колото на ЗС на мрежата/системот во услови на постоење на куса врска/земјоспој. Подоцна, врз основа на познатите потенцијали на поедините заземјувачи од ЗС се врши пресметка на распределбата на потенцијалите по површината од земјата околу секој заземјувач. За да може, пак, да се направат овие пресметки неопходно е секој елемент

од ЗС како и врските помеѓу елементите од ЗС да бидат моделирани на соодветен начин.

9.1.1 Моделирање на концентрираните заземјувачи на електроенергетските објекти (ЕЕО)

Секоја разводна постројка (РП) или трансформаторска станица ТС што има сопствен заземјувач, во колото на ЗС воведува еден јазел наречен „заземјувачко место“. Самиот заземјувач во тоа коло се моделира со напречно поставена активна отпорност R_Z чија што вредност е еднаква на отпорноста на распростирање на заземјувачот на ТС. Во случајот кога поголем број различни заземјувачи се галвански поврзани во едно исто заземјувачко место, во заменската шема (колото) на ЗС ќе се појават онолку паралелно врзани активни отпорности колку што има заземјувачи, галвански поврзани во посматраното заземјувачко место. Ако два или повеќе засебни електроенергетски објекта имаат заеднички заземјувач, тие во колото на ЗС ќе се моделираат со еден единствен елемент – напречно поставена активна отпорност т.е. тие ќе воведат само едно заземјувачко место.

9.1.2 Моделирање на надземните водови

Надземните водови со заштитно јаже се активни елементи на ЗС. Тие ги поврзуваат галвански заземјувачите од соседните постројки и учествуваат во извозот на потенцијалите и во распределбата на струјата на грешка по одделните заземјувачи на елементите од мрежата но во исто време и самите тие дејствуваат како заземјувачи, одведувајќи дел од струјата на земјоспојот во земјата. Во колото од ЗС на мрежата тие се претставуваат со еквивалентен π -четворопол со параметри \underline{Y}_{P1} , \underline{Z}_P и \underline{Y}_{P2} , односно со една надолжна импеданција \underline{Z}_P и две напречно поставени адмитанции \underline{Y}_{P1} и \underline{Y}_{P2} , кои во општ случај имаат различни вредности. Кога водот се претставува идеализирано, со еднакви распони и еднакви отпорности на заземјување на столбовите, тогаш еквивалентниот π -четворопол е симетричен, т.е. $\underline{Y}_P = \underline{Y}_{P1} = \underline{Y}_{P2}$, (слика 7.3), а вредностите на неговите параметри \underline{Z}_P и \underline{Y}_P се пресметуваат со помош на изразите (7.20) и (7.21), соодветно. Ако се земе предвид и заемната спрега помеѓу фазните спроводници и заштитното јаже, тогаш во заменската шема на π -четворополот со кој што се моделира надземниот вод ќе се појави и уште еден струен генератор чија што вредност се пресметува во согласност со изложеното во точката 7.3. Доколку, пак, се посматра земјоспој на самиот вод, тогаш во согласност со сликите 7.8 и 7.9, во моделот на водот ќе се појават

три струјни генератори со струи што се пресметуваат според релациите (7.32).

Надземните водови без заштитно јаже не претставуваат елементи на ЗС на мрежата.

9.1.3 Моделирање на електроенергетските кабли

Електроенергетските кабли со изолиран метален плашт не дејствуваат непосредно како заземјувачи, туку посредно, поврзувајќи ги заземјувачите на објектите меѓу кои што се положени. Тие се јавуваат само во улога на “извозници” на потенцијалот и распределувачи на струјата на грешката по одделните заземјувачи на системот. Во еквивалентното коло на ЗС тие се претставуваат со една I-заменска шема односно со една надолжна импеданција \underline{Z} пресметана според релацијата (8.21). Ако покрај ваквите кабли е поставено, во истиот ров, и бакарно јаже или челична лента, поврзана галвански на обата краја со металните делови од конструкцијата на кабелот (плашт, арматура, електрична заштита), како дополнителен заземјувач, во тој случај на I-заменската шема на кабелот ќе се суперпонира и соодветниот π -еквивалентен четворпол со кој се моделира јажетото/лентата третирали како заземјувач со распределени параметри. Самото моделирање на дополнителниот заземјувач се врши на начин како што тоа беше опишано во точката 8.2, т.е. со помош на еден симетричен π -четворпол според сликата 8.4, чии што параметри се пресметуваат со помош на изразите (8.8) и (8.9).

Каблите со спроводен надворешен плашт освен тоа што вршат галванско поврзување на заземјувачите од соседните постројки тие играат и улога на одведувачи на струјата на доземниот спој во земјата т.е. улога на заземјувачи со распределени параметри. Затоа тие во заменската шема на ЗС се претставуваат со еквивалентен π -четворпол. Вредностите на параметрите \underline{Z}_P и \underline{Y}_P се пресметуваат според (8.8) и (8.9), соодветно.

Доколку за време на земјоспојот тече струја и низ некоја од жилите на кабелскиот вод, тогаш поради постоењето на меѓусебната електромагнетна спрега помеѓу жилата на фазниот спроводник и металните делови од конструкцијата на кабелот, во металната конструкција ќе се индуцира соодветна емс која што се моделира со еден струен генератор кој што ги поврзува почетокот и крајот од I односно π -заменската шема на кабелот.

9.1.4 Моделирање на струјата на земјоспојот

Кога ќе настане грешка со земја (земјоспој) на било кое место во мрежата (вод, разводна постројка или трансформаторска станица) струјата на земјоспој \underline{J}_K што се инјектира во ЗС на местото на грешката се распределува по одделните елементи што се галвански поврзани со елементот/објектот кај кој што настанала грешката. Значи целата инјектирана струја во ЗС не оди во земјата преку заземјувачот на тој објект туку голем дел од неа се одведува од местото на грешката преку приклучните НВ и кабли кон другите елементи на ЗС. Самата грешка притоа се моделира со идеален струен генератор со струја еднаква на струјата на доземен спој \underline{J}_K , инјектирана на местото на грешка (слика 9.2).

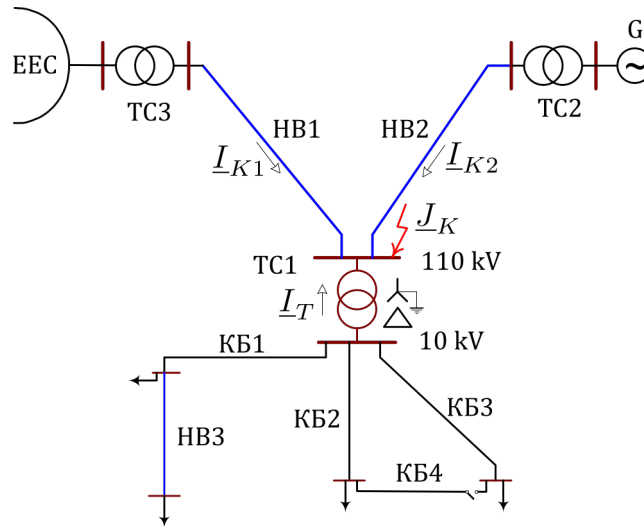
9.1.5 Формирање на колото на заземјувачкиот систем

И покрај тоа што електроенергетските мрежи претставуваат трифазни електрични кола, колото на нивниот заземјувачки систем е монофазно со земјата како повратен пат. Тоа ја има истата или има слична топологија како и изворната мрежа. Но понекогаш (особено кај СН и НН кабелски мрежи формирани од кабли со метален плашт) топологијата на колото на ЗС може да биде и различна, т.е. малку посложена од топологијата на реалната трифазна мрежа. Така, на пример, среднонапонските дистрибутивни мрежи обично работат (во електричка смисла) радијално, со отворени прстени, поради постоењето на резервните водови кои што се нормално отворени (NO). Но во колото на ЗС од мрежата истите тие резервни водови галвански ги поврзуваат заземјувачите на обата свои краја и на тој начин формираат затворена контура. Истовремено се можни и обратни ситуации ако се работи за надземен вод без заштитно јаже или пак за кабел без метален плашт односно метална арматура.

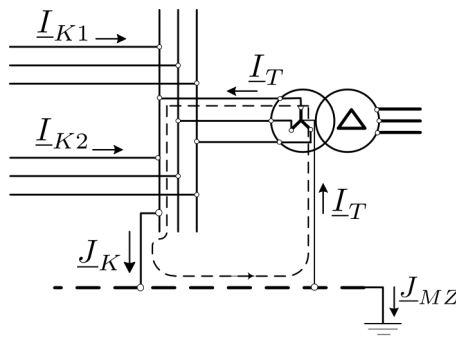
Кога секој елемент од мрежата се претстави со соодветната еквивалентна шема и кога сите елементи меѓусебно се поврзат на начин како што е тоа направено во реалната мрежа, се добива заменската шема, т.е. колото, на ЗС.

Досега реченото ќе го илустрираме на примерот прикажан на сликата 9.1. На сликата 9.1 е прикажана еднополната шема на дел до еден ЕЕС во кој се среќаваат практично сите елементи со кои што сме се сретнале досега: два вода на една 110 kV мрежа (надземните водови НВ1 и НВ2 кои се снабдени со заштитно јаже), елементи на една 10 kV мрежа (надземниот вод НВ3 кој што нема заштитно јаже и каблите КБ1, КБ2, КБ3 и КБ4) како и две трансформаторски станици ТС1 и ТС2.

Мрежата се посматра во режим на работа со земјоспој (еднофазна куса врска) настанат на ВН собирници при ТС1, со струја на земјоспојот \underline{J}_K . На сликата 9.3, пак, е прикажано колото на соодветниот заземјувачки систем на набљудуваната мрежа.



Слика 9.1. Електроенергетска мрежа со две напонски нивоа

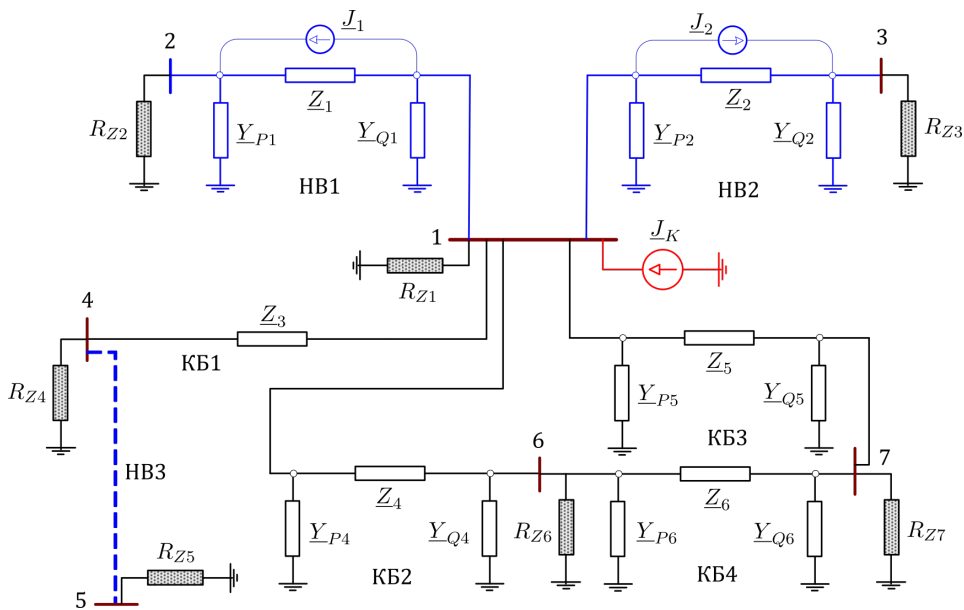


Слика 9.2. Струи на местото на куса врска

Легенда: \underline{J}_K – вкупна струја на куса врска, \underline{I}_{K1} и \underline{I}_{K2} – струи на куса врска што доаѓаат кон местото на куса врска по надземните водови, \underline{I}_T – струја низ ѕвездиштето на трансформаторот, \underline{I}_{MZ} – струја што се одведува преку мрежестиот заземјувач

Во колото на ЗС, прикажано на сликата 9.3 се воведени следните обележувања. Со броевите 1, 2, ..., 7 се нумерирани заземјувачките јазли од колото на ЗС, додека со $R_{Z1}, R_{Z2}, \dots, R_{Z7}$ се означени отпорностите на распростирање на заземјувачите во тие постројки. Со сини линии се означени соодветните четворополи со кои се претставени

надземните водови. Среднонапонскиот 10 kV надземен вод НВ3 е означен со испрекинатата линија бидејќи нема заштитно јаже така што тој претставува прекин на струите во колото на ЗС. Со \underline{Y}_{P1} , \underline{Z}_1 и \underline{Y}_{Q1} се означени соодветните елементи од π -заменската шема за водот НВ1. Слично, \underline{Y}_{P2} , \underline{Z}_2 и \underline{Y}_{Q2} се означени соодветните елементи од π -заменската шема за водот НВ2.



Слика 9.3. Коло на заземјувачкиот систем за мрежата од сликата 9.1

Покрај тоа со \underline{J}_1 и \underline{J}_2 се означени соодветните струјни генератори со помош на кои се претставуваат (еквивалентираат) индуцираните емс во заштитните јажиња на овие два вода, во согласност со изложеното во поглавјето 7.3.

Кабелот КБ1 е со изолиран метален плашт така што неговата заменска шема нема попречни гранки, додека каблите КБ2, КБ3 и КБ4 се со неизолиран метален плашт така што и тие се прикажни со соодветните π -заменски шеми помеѓу јазлите 1-6, 1-7 и 6-7. Треба да се одбележи дека кабелот КБ4, како што се гледа од сликата 9.1, претставува „резервен вод“ кој е на едниот крај исклучен и како таков тој не пренесува електрична енергија додека контурата 1-6-7-1 е, во електрична, смисла отворена. Сепак бидејќи металните делови од каблите кои што ја сочинуваат оваа контура се преку врските со соодветните заземјувачи на ТС СН/НН заемно галвански поврзани, во заземјувачкиот систем ќе се појави оваа контура како затворена.

9.2 Нумеричка постапка за пресметување

9.2.1 Пресметка на напоните во колото на ЗС

Кога станува збор за сложен заземјувачки систем со поголем број јазли n , постапката за пресметување на состојбата во колото на заземјувачкиот систем (КЗС) е неможно да се реши на едноставен начин со проста примена на Кирхофовите закони, туку за таа цел се применуваат современи, компјутерски ориентирани нумерички методи. Решавањето на КЗС наједноставно се врши со директна примена на методот на јазлови потенцијали (МЈП). Според овој метод, за секој јазел j од КЗС може да се напише по една комплексна равенка од типот (9.1) која ја дава врската помеѓу инјектираната струја \underline{J}_j во тој јазел и напоните \underline{U}_k ($k = 1, 2, \dots, n$) во сите n јазли од КЗС

$$\underline{J}_j = \sum_{k=1}^n \underline{Y}_{jk} \cdot \underline{U}_k; \quad j = 1, 2, \dots, n. \quad (9.1)$$

Ако за секој јазел j од КЗС напишеме по една ваква равенка, ќе добиеме линеарен систем од n комплексни равенки, кој што изразен во матрична нотација, гласи

$$\underline{Y} \cdot \underline{U} = \underline{J}. \quad (9.2)$$

На десната страна во системот (9.2) фигурира матрицата колона \underline{J} на инјектираните струи во јазлите од колото на заземјувачкиот систем, \underline{U} претставува матрица колона на напоните во јазлите (т.е. заземјувачките места) од КЗС додека, пак, \underline{Y} е матрицата на адмитанции на КЗС. За колото од сликата 9.3 овие матрици ќе бидат

$$\underline{J} = \begin{bmatrix} \underline{J}_K - \underline{J}_1 - \underline{J}_2 \\ \underline{J}_2 \\ \underline{J}_3 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad \underline{U} = \begin{bmatrix} \underline{U}_1 \\ \underline{U}_2 \\ \underline{U}_3 \\ \underline{U}_4 \\ \underline{U}_5 \\ \underline{U}_6 \\ \underline{U}_7 \end{bmatrix},$$

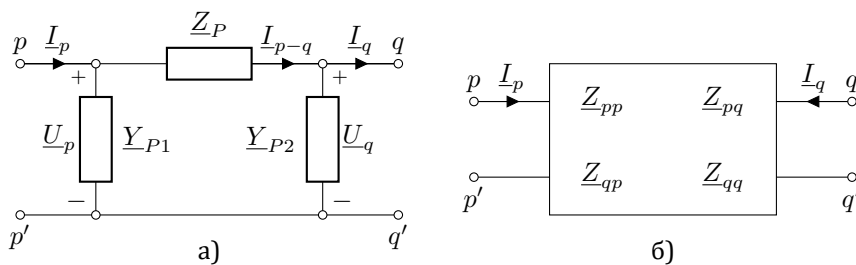
$$\underline{Y} = \begin{bmatrix} \underline{Y}_{11} & -\underline{Z}_1^{-1} & -\underline{Z}_2^{-1} & -\underline{Z}_3^{-1} & 0 & -\underline{Z}_4^{-1} & -\underline{Z}_5^{-1} \\ -\underline{Z}_1^{-1} & \underline{Y}_{22} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\underline{Z}_2^{-1} & 0 & \underline{Y}_{33} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\underline{Z}_3^{-1} & 0 & 0 & \underline{Y}_{44} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \underline{Y}_{55} & 0 & 0 \\ -\underline{Z}_4^{-1} & 0 & 0 & 0 & 0 & \underline{Y}_{66} & -\underline{Z}_6^{-1} \\ -\underline{Z}_5^{-1} & 0 & 0 & 0 & 0 & -\underline{Z}_6^{-1} & \underline{Y}_{77} \end{bmatrix}.$$

Дијагоналните елементи од матрицата \underline{Y} се добиваат како сума од адмитанциите на гранките поврзани за соодветните јазли. Согласно на тоа во матрицата \underline{Y} од системот равенки (9.2) дијагоналните елементи изнесуваат

$$\begin{aligned} \underline{Y}_{11} &= R_{Z_1}^{-1} + \underline{Y}_{Q_1} + \underline{Y}_{P_2} + \underline{Z}_1^{-1} + \underline{Z}_2^{-1} + \underline{Z}_3^{-1} + \underline{Y}_{P_4} + \underline{Z}_4^{-1} + \underline{Y}_{P_5} + \underline{Z}_5^{-1}, \\ \underline{Y}_{22} &= R_{Z_2}^{-1} + \underline{Y}_{P_1} + \underline{Z}_1^{-1}, \\ \underline{Y}_{33} &= R_{Z_3}^{-1} + \underline{Y}_{Q_2} + \underline{Z}_2^{-1}, \\ \underline{Y}_{44} &= R_{Z_4}^{-1} + \underline{Z}_3^{-1}, \\ \underline{Y}_{55} &= R_{Z_5}^{-1}, \\ \underline{Y}_{66} &= R_{Z_6}^{-1} + \underline{Z}_4^{-1} + \underline{Y}_{Q_4} + \underline{Y}_{P_6} + \underline{Z}_6^{-1}, \\ \underline{Y}_{77} &= R_{Z_7}^{-1} + \underline{Y}_{Q_5} + \underline{Z}_5^{-1} + \underline{Y}_{Q_6} + \underline{Z}_6^{-1}. \end{aligned}$$

Со решавањето на системот равенки (9.2) се добиваат најнапред напоните во јазлите на колото на заземјувачкиот систем, а потоа и струите во гранките од колото.

9.2.2 Пресметка на струите во колото на заземјувачкиот систем



Слика 9.4. Елемент од заземјувачки систем претставен со четворокрајник

Секој елемент од КЗС во принцип се претставува со еден четворопол (четворокрајник или мрежа со два пристапа). Од друга страна за секој четворопол (слика 9.4), помеѓу паровите јазли p и q , во општ случај, може да се напишат следните релации

$$\begin{aligned} \underline{I}_{p-q} &= (\underline{U}_p - \underline{U}_q) / \underline{Z}_P, \\ \underline{I}_p &= \underline{I}_{p-q} + \underline{Y}_{P1} \cdot \underline{U}_p, \\ \underline{I}_q &= \underline{I}_{p-q} - \underline{Y}_{P2} \cdot \underline{U}_q, \end{aligned} \quad (9.3)$$

со помош на кои се пресметуваат струите во гранките од КЗС.

Струите на одведување во земјата од одделните заземјувачи на ЗС ќе бидат

$$\underline{I}_{Zi} = \frac{\underline{U}_i}{R_{Zi}}; \quad i = 1, 2, \dots, n. \quad (9.4)$$

9.2.3 Примери од областа на сложените заземјувачки системи

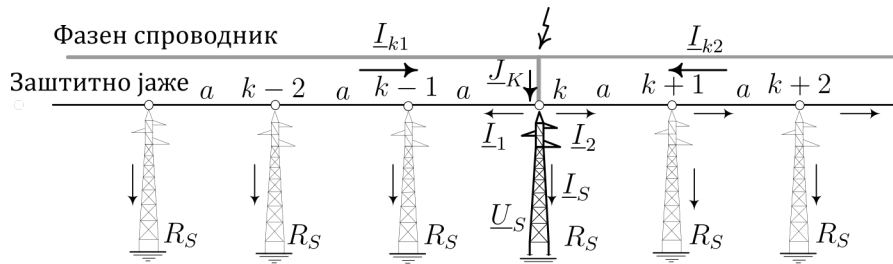
Пример 9.1. Се посматра режим на еднофазна куса врска настаната некаде на средината од еден 110 kV надземен вод, долг $l = 50$ km. Вкупната струја на куса врска изнесува $J_K = 4,2$ kA и (слика П.9.1.1) притоа од левата страна на водот по фазниот спроводник кон местото на кусата врска доаѓа струја од $I_{k1} = 2,7$ kA додека од спротивната страна доаѓа струја $I_{k2} = 1,5$ kA ($\underline{I}_{k1} + \underline{I}_{k2} = \underline{J}_K$). Сите струи се во фаза.

За водот се познати следните податоци: спроводници Al/Џ 240/40 mm²; заштитно јаже Fe III 50 mm²; столбови тип М4, според сликата од примерот 7.1; специфична отпорност на тлото по должината на трасата од надземниот вод $\rho = 100$ Ωm; просечна вредност на отпорностите на распростирање на заземјувачите од столбовите $R_S = 10$ Ω; просечна вредност на распоните $a = 250$ m. Познати се уште и следните податоци: сопствена импеданиција на заштитното јаже $\underline{z} = (3,082 + j1,289) = 3,322 \cdot e^{j21,9^\circ}$ Ω/km (видете го примерот 7.1); меѓусебна импеданција помеѓу фазниот спроводник и заштитното јаже $\underline{z}_m = (0,05 + j0,355) = 0,358 \cdot e^{j82^\circ}$ Ω/km; редукионен фактор $\underline{r}_f = 0,95 \cdot e^{-j5,6^\circ}$.

Да се пресмета распределбата на струите во заземјувачкиот систем од водот на местото на грешката како и потенцијалот на столбот погоден со земјоспој. Резултатите од пресметките да се повторат и за случајот кога заштитното јаже од надземниот вод е изведено од комбинирано Al/Џ јаже 50/30 mm² за кое што е познато: $\underline{z} = (0,614 + j0,767) = 0,983 \cdot e^{j51,3^\circ}$ Ω/km; $\underline{r}_f = 0,711 \cdot e^{-j15,2^\circ}$.

Решение

На сликата П.9.1.1 е прикажана распределбата на струите на кусата врска во околината на местото на грешката. За да ја определеме распределбата на струите на грешката во ЗС во околината на местото на грешката најдобро ќе биде секоја од половините да ја претставиме со соодветната π -заменска шема, или, уште подобро, со својата влезна импеданција \underline{Z}_{vl} .



Слика П.9.1.1. Распределба на струите на куса врска

Разгледуваниот надземен вод, според зададените податоци ќе има вкупно $n = l/a = 160$ распони, додека половината вод ќе има $n' = 80$ распони. Во глава 7 од учебникот беше покажано (видете го примерот 7.3) дека граничниот број распони после кое надземниот вод снабден со класично јаже Fe III 50 mm², како и во разгледуваниот случај, може да се третира како „бесконечно долг“, изнесува негде околу $n_d = 11$ распони, што е многу повеќе од бројот распони n' во секоја од половините на водот. Кога е водот доволно долг ($n > n_d$), како во разгледуваниот случај, тогаш за пресметка на влезната импеданција на делот од водот лево од местото на грешката може да се примени упростениот израз (7.23) кој што ја дава приближната вредност на влезната импеданција на водот, но на многу поедноставен начин

$$\underline{Z}_r = \underline{z} \cdot a = (0,771 + j0,322) = 0,835 \cdot e^{j22,7^\circ} \Omega;$$

$$\underline{Z}_{vl} \approx \sqrt{\underline{Z}_r \cdot R_S} - \frac{\underline{Z}_r}{2} = 2,51 \cdot e^{j9,74^\circ} \Omega.$$

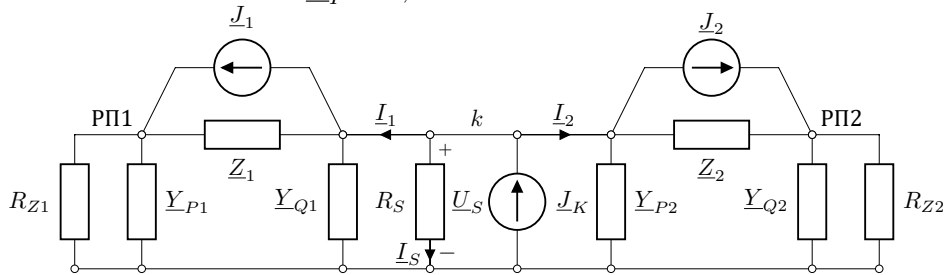
Во последната формула со \underline{Z}_r е означена импеданцијата на заштитното јаже во еден распон, додека со R_S е означена просечната вредност на отпорноста на распостирање на заземјувачите од столбот.

За да ги пресметаме струите \underline{I}_1 , \underline{I}_2 и \underline{I}_S во заземјувачкиот систем од надземниот вод ќе се послужиме со колото на ЗС прикажано на сликата П.9.1.2. Во него секоја половина од водот е претставена со соодветниот π -четворпол со параметри \underline{Y}_P , \underline{Z} и \underline{Y}_Q ($\underline{Y}_Q = \underline{Y}_P$), пресметани со помош

на изразите (7.20) и (7.21). Нивните вредности во конкретниот случај ќе бидат

$$\underline{Z}_P = 115.746,5 \cdot e^{j140,2^\circ} \Omega;$$

$$\underline{Y}_P = 0,399 \cdot e^{-j9,74^\circ} \text{ S}.$$



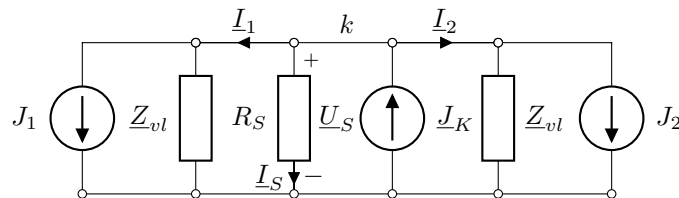
Слика П.9.1.2. Моделирање на ЗС на надземниот вод и негово упростување

Како што и можеше да се очекува со оглед на должината на водот, параметрите \underline{Z}_P и \underline{Y}_P на π -заменската шема на водот ќе имаат вредности за кои што важи

$$\underline{Z} \equiv \underline{Z}_P \rightarrow \infty,$$

$$\underline{Y}_P \rightarrow 1/\underline{Z}_{vl}.$$

Тоа дозволува наместо со колото од сликата П.9.1.2, да работиме со колото на ЗС прикажано на сликата П.9.1.3, во кое секоја половина од водот се еквивалентира само со по една попречна импеданција, еднаква на влезната импеданција на водот \underline{Z}_{vl} .



Слика П.9.1.3. Упростување на моделот од сликата П.9.1.2

Во колата на заземјувачкиот систем од сликите П.9.1.2 и П.9.1.3 со \underline{J}_1 и \underline{J}_2 се означени еквивалентните струјни генератори со кои се опфаќа влијанието на магнетската спрега помеѓу фазниот спроводник по којшто тече струјата на грешката и заштитното јаже. За нив важи

$$\underline{r}_f = 0,95 \cdot e^{-j5,6^\circ}; \quad \underline{c}_f = 1 - \underline{r}_f = (0,055 + j0,09215) = 0,107 \cdot e^{j59,3^\circ};$$

$$\underline{J}_1 = (1 - \underline{r}_f) \cdot \underline{I}_{K1} = 0,107 \cdot e^{j59,3^\circ} \cdot 2,7 = 0,289 \cdot e^{j59,3^\circ} \text{ kA};$$

$$\underline{J}_2 = (1 - \underline{r}_f) \cdot \underline{I}_{K2} = 0,107 \cdot e^{j59,3^\circ} \cdot 1,5 = 0,161 \cdot e^{j59,3^\circ} \text{ kA}.$$

Притоа е усвоено дека комплексните претставници на струите на куса врска \underline{J}_K , \underline{I}_{K1} и \underline{I}_{K2} се на фазната оска, т.е. имаат аргумент 0.

Сега можеме да ја пресметаме вкупната струја \underline{J}_Z што се инјектира во заземјувачкиот систем на местото на грешката (јазелот k), а потоа и напонот \underline{U}_S како и струјата \underline{I}_S низ столбот на местото на грешката

$$\underline{J}_Z = \underline{J}_K - \underline{J}_1 - \underline{J}_2 = r_f \cdot \underline{J}_K = (3,97 - j0,387) = 3,989 \cdot e^{-j5,6^\circ} \text{ kA.}$$

Еквивалентната импеданција на ЗС на местото на грешката изнесува

$$\underline{Z}_{ek} = \underline{Z}_{vl} \Pi \underline{Z}_{vl} \Pi R_S = (2,51/2) \cdot e^{j9,74^\circ} \Pi 10 = 1,116 \cdot e^{j8,65^\circ} \Omega;$$

$$\underline{U}_S = \underline{Z}_{ek} \cdot \underline{J}_Z = 1,116 \cdot e^{j8,65^\circ} \cdot 3,989 \cdot e^{-j5,6^\circ} = 4,453 \cdot e^{j3,1^\circ} \text{ kV;}$$

$$\underline{I}_S = \underline{U}_S / R_S = 0,4453 \cdot e^{j3,1^\circ} \text{ kA.}$$

Од причини на симетрија ќе биде $\underline{I}_1 = \underline{I}_2$. Во тој случај, врз основа на Кирхофовиот закон за струи за јазелот k , ќе имаме:

$$\underline{I}_1 = \underline{I}_2 = (\underline{J}_K - \underline{I}_S) / 2 = (1,878 - j2,299) = 1,878 \cdot e^{j-0,4^\circ} \text{ kA.}$$

Значи од вкупната струја на грешка низ столбот истекуваат во земјата 10,6%, додека преостанатите 89,4% се делат по половина лево и десно од местото на грешката по заштитното јаже.

Забелешка: ако постапката ја повториме и за случајот кога се применува заштитното јаже од поспроводен материјал, тип Al/Č 50/30 mm², тогаш ќе ги добиеме следните резултати

$$r_f = 0,711 \cdot e^{-j15,2^\circ};$$

$$\underline{J}_1 = 0,984 \cdot e^{j30,7^\circ} \text{ kA; } \underline{J}_2 = 0,547 \cdot e^{j30,7^\circ} \text{ kA; } \underline{J}_Z = 2,988 \cdot e^{-j15,2^\circ} \text{ kA;}$$

$$\underline{Z}_{vl} = 1,4604 \cdot e^{j23,72^\circ} \Omega; \quad \underline{Z}_{ek} = \underline{Z}_{vl} \Pi \underline{Z}_{vl} \Pi R_S = 0,684 \cdot e^{j22,14^\circ} \Omega;$$

$$\underline{U}_S = \underline{Z}_{ek} \cdot \underline{J}_Z = 2,044 \cdot e^{j7,0^\circ} \text{ kV;}$$

$$\underline{I}_S = \underline{U}_S / R_S = 0,2044 \cdot e^{j7,0^\circ} \text{ kA; } 4,9\% \text{ од } J_K;$$

$$\underline{I}_1 = \underline{I}_2 = (\underline{J}_K - \underline{I}_S) / 2 = 1,999 \cdot e^{j-0,4^\circ} \text{ kA; } 47,5\% \text{ од } J_K;$$

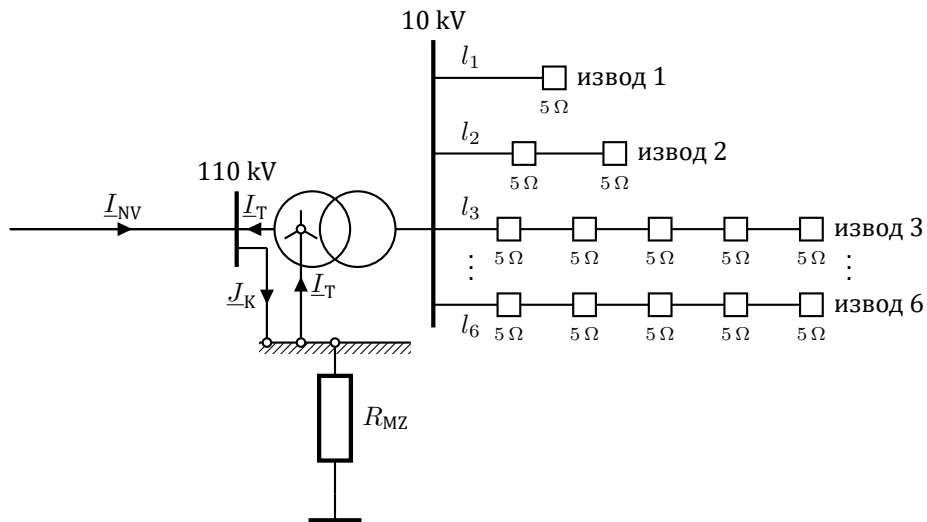
Заклучуваме дека во овој случај приликите на местото на земјоспојот се значително порелаксирани, т.е. напоните на допир и чекор околу столбот ќе бидат за повеќе од два пати помали.

□ □ □

Пример 9.2. Трансформаторска станица ТС 110/10 kV/kV, 31,5 MVA се напојува од еден 110 kV вод со челично заштитно јаже Fe III 50 mm². Карактеристиките на напојниот вод се исти со карактеристиките на надземниот вод од примерот 9.1 ($\underline{Z}_{vl} = 2,51 \cdot e^{j9,74^\circ}$, $r_f = 0,95 \cdot e^{-j5,6^\circ}$). Од оваа ТС се напојуваат 6 СН кабелски изводи (слика П.9.2.1) и тоа

- извод бр. 1 изведен со класичен кабел од типот IPO 13 3x95 6/10 kV со должина $l_1 = 800$ m, на чиј крај се наоѓа индустриска ТС СН/НН 2x1000 kVA, со отпорност на распростирање на работниот заземјувач $R_{Z1} = 4 \Omega$, специфична отпорност на теренот $\rho = 100 \Omega\text{m}$;
- извод бр. 2 изведен со класичен кабел од типот IPO 13 3x95 6/10 kV со вкупна должина $l_2 = 1200$ m, по чија должина рамномерно се наоѓаат 2 ТС СН/НН 630 kVA, со отпорност на распростирање на работните заземјувачи $R_{Z2} = 5 \Omega$ секој; $\rho = 100 \Omega\text{m}$;
- 4 идентични изводи (бр. 3, 4, 5 и 6) од по $l_3 = 2500$ m, изведени со кабли од типот ХНЕ 49 А 3x1x150, 6/10 kV. Секој од каблите напојува по 5 ТС СН/НН, рамномерно распределени по нивната должина. Отпорноста на распростирање на работните заземјувачи на овие ТС изнесуваат $R_{Z3} = 5 \Omega$ секој.

Мрежестиот заземјувач на напојната ТС 110/10 kV/kV има форма на правоаголник со димензии $a \times b = 100 \times 50$ m, изведен од бакарно јаже $\text{Cu } 70 \text{ mm}^2$, закопано во тло со специфична отпорност $\rho = 100 \Omega\text{m}$ на длабочина $h = 0,8$ m. Окцата на заземјувачот имаат димензии 10×10 m така што вкупната должина на електродите на заземјувачот изнесува $L_\Sigma = 6 \times 100 + 11 \times 50 = 1150$ m. Со пресметки се добиени карактеристиките на овој заземјувач: $R_{MZ} = 0,661 \Omega$; $E_{d.\text{max}} = 24,7\%$; $E_{c.\text{max}} = 7,1\%$.



Слика П.9.2.1. ТС 110/10 kV/kV заедно со припадната СН кабелска мрежа

Со пресметки, исто така, добиени се влезните импеданции (импеданциите на заземјување) на напојниот 110 kV надземен

вод $Z_{vl.NV}$, неговиот редукционен фактор $r_{f.NV}$, како и влезните импеданции $Z_{vl.k}$ и факторите на изнесенiot потенцијал до првите ТС СН/НН $k_{i.k}$ на поедините СН изводи k

$$\begin{aligned} Z_{vl.NV} &= 2,510 \cdot e^{j9,74^\circ} \Omega; & r_{f.NV} &= 0,95 \cdot e^{-j5,6^\circ}; \\ Z_{vl.1} &= 0,727 \cdot e^{j34,4^\circ} \Omega; & k_{i.1} &= 0,280 \cdot e^{-j79,7^\circ}; \\ Z_{vl.2} &= 0,145 \cdot e^{j11,8^\circ} \Omega; & k_{i.2} &= 0,308 \cdot e^{-j57,3^\circ}; \\ Z_{vl.3} &= 0,901 \cdot e^{j28,9^\circ} \Omega; & k_{i.3} &= 0,742 \cdot e^{-j14,5^\circ}. \end{aligned}$$

Останатите изводи имаат исти карактеристики како и третиот извод, т.е.

$$\begin{aligned} Z_{vl.4} &= Z_{vl.5} = Z_{vl.6} = 0,901 \cdot e^{j28,9^\circ} \Omega; \\ k_{i.4} &= k_{i.5} = k_{i.6} = 0,742 \cdot e^{-j14,5^\circ}. \end{aligned}$$

Останати податоци

- Вкупна струја на еднофазна куса врска настаната во ТС ВН/СН $J_K = 6$ kA;
- Фазна струја на грешка што тече по надземниот вод $I_{NV} = 5,2$ kA;
- Фазна струја на грешка што тече кон местото на куса врска од енергетскиот трансформатор $I_T = 0,8$ kA;

Да се пресмета

- а) напонот U_{MZ} на мрежестиот заземјува како и најголемите напони на допир и чекор во ТС 110/10 kV. Да се провери дали има опасност по луѓето?
- б) распределбата на струите на одведување I_1, I_2, \dots, I_8 по изводите за време на грешката како и напоните U_1, U_2, \dots, U_8 кај првите ТС СН/НН во секој од изводите.

Решение

Струјата J_Z што се инјектира во заземјувачкиот систем ќе биде

$$J_Z = J_K - I_T - (1 - r_{f.NV}) \cdot I_{NV} = r_{f.NV} \cdot I_{NV} = 4,94 \cdot e^{-j5,6^\circ} \text{ kA}.$$

Еквивалентата импеданција на заземјувачиот систем Z_{ek} ќе ја добиеме како паралелна комбинација на сите импеданции на заземјување на надземните водови со заштитно јаже (овде тоа е само ВН напоен вод) и сите импеданции (т.е. влезни импеданции) на заземјување на кабелските изводи што излегуваат од ТС, т.е.

$$Z_{ek} = R_{MZ} \Pi Z_{vl.NV} \Pi Z_{vl.1} \Pi Z_{vl.2} \Pi Z_{vl.3} \Pi Z_{vl.4} \Pi Z_{vl.5} \Pi Z_{vl.6},$$

или

$$\underline{Z}_{ek} = \left(\frac{1}{R_{MZ}} + \frac{1}{Z_{vl.NV}} + \sum_{k=1}^6 \frac{1}{Z_{vl.k}} \right)^{-1} =$$

$$= (0,066253 + j0,021315) = 0,0696 \cdot e^{j17,8^\circ} \Omega.$$

Напонот \underline{U}_{MZ} на мрежестиот заземјувач за време на земјоспојот ќе биде

$$\underline{U}_{MZ} = \underline{Z}_{ek} \cdot \underline{J}_Z = 344 \cdot e^{-j1,2^\circ} \text{ V}.$$

Напоните на првите ТС СН/НН во одделните изводи ќе ги добиеме со помош на коефициентите на изнесување на потенцијалот $k_{i.k}$, според релацијата

$$\underline{U}_k = k_{i.k} \cdot \underline{U}_{MZ}; \quad k = 1, 2, \dots, 6.$$

На тој начин ја добиваме табелата П.9.2.1 во која се прикажни пресметаните вредности на напоните U_k кај првите ТС СН/НН и струите на одведување I_k од поедините изводи ($k = 1, 2, \dots, 6$).

Табела П.9.2.1. Резултати од пресметките на напоните и струите во СН мрежа

	ИЗВОД						
U_{MZ}	1	2	3	4	5	6	
U_k (V)	344	96	106	255	255	255	255
I_k (A)	520	473	2371	382	382	382	382

Најголемиот напон на допир во постројката на ТС 110/10 kV ќе биде

$$U_{d.\max} = \frac{E_{d.\max}}{s_d} = \frac{E_{d.\max}\%}{100} \cdot \frac{U_{MZ}}{s_d} = \frac{24,7}{100} \cdot \frac{344}{1,15} = 74 \text{ V}.$$

Бидејќи е $U_{d.\max} < U_{d.\text{doz}} = 230 \text{ V}$, опасности во постројката од превисоки напони на допир ќе нема. Во поглед на опасностите од превисоки напони на чекор, јасно е дека такви проверки не се неопходни.

□ □ □

Задача 9.1. Во ТС 110/10 од примерот 9.2 се предвидува изградба на уште еден 110 kV напоен вод со заштитно јаже тип Al/Џ 50/30. Со изградбата на новиот вод (NV2) се менуваат и струите на куси врски така што во новите услови ќе имаме $J_K = 10,6 \text{ kA}$; $I_{NV1} = 5,1 \text{ kA}$; $I_{NV2} = 4,8 \text{ kA}$; $I_T = 0,7 \text{ kA}$. Да се пресметаат приликите во ЗС на мрежата и за овој случај. Дали во новите услови ќе има опасности од превисоки напони

на допир во постројката на ТС 110/10 kV. За новиот вод, посматран како елемент на ЗС се познати следните податоци

$$\underline{Z}_{vl.NV2} = 1,4604 \cdot e^{j23,72^\circ} \Omega; \quad r_{f.NV2} = 0,711 \cdot e^{-j15,2^\circ}$$

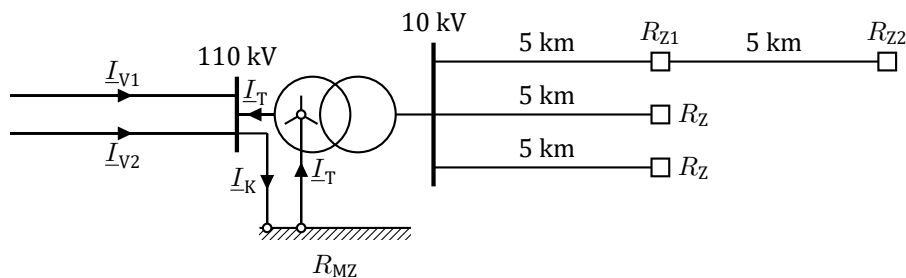
Решение

$$\underline{Z}_{ek} = 0,066447 \cdot e^{j18,1^\circ} \Omega; \quad \underline{J}_Z = 8,23 \cdot e^{-j9,6^\circ} \text{ kA}; \quad U_{MZ} = 547 \text{ V}.$$

□ □ □

Пример 9.3. Во една трансформаторска станица 110/10 kV/kV инсталиран е трансформатор чии намотки на 110 kV се поврзани во звезда и се директно заземјени. Таа се напојува од два 110 kV вода со заштитни јажиња, додека на 10 kV од неа се напојуваат 3 кабелски изводи. Познати се следните податоци:

- Надземните водови за 110 kV имаат $\underline{Z}_{vl,V} = 3,1 \cdot e^{j4^\circ} = (3,09 + j0,22) \Omega$ и $r_f = 0,68 \cdot e^{j10^\circ}$;
- Првиот кабелски извод е изведен со кабел со изолиран плашт со надолжна импеданција $\underline{z} = (0,4 + j0,8) \Omega/\text{km}$. Тој се состои од две секции кои се долги по 5 km. На крајот од секоја секција има трафостаница 10/0,4 kV/kV која што има заштитен заземјувач со отпорност на заземјувачот $R_{Z1} = 8 \Omega$ и $R_{Z2} = 2 \Omega$, соодветно.
- Останатите 2 кабелски изводи се идентични и се е изведени со кабел со изолиран плашт со надолжна импеданција $\underline{z} = (0,4 + j0,8) \Omega/\text{km}$. Нивните должини се по 5 km, а на крајот од нив има трафостаница 10/0,4 kV/kV која што има заштитен заземјувач со отпорност на заземјувачот $R_Z = 5 \Omega$.



Слика П.9.3.1

Во високонапонската трафостаница настанала еднофазна куса врска на 110 kV, при што вкупната струја на куса врска изнесува $\underline{I}_K =$

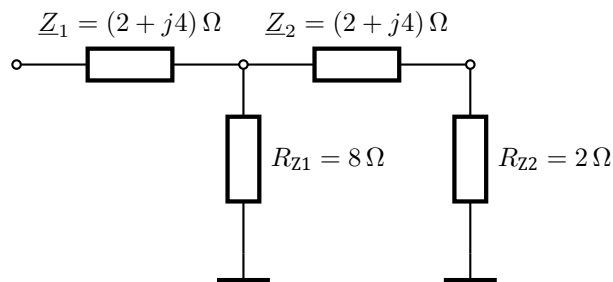
10 kA. Познати се и струите на грешка што течат во водовите и во трансформаторот: $I_{V1} = 5$ kA, $I_{V2} = 3$ kA и $I_T = 2$ kA. Отпорноста на распростирање на мрежестиот заземјувач на трафостаницата е $R_{MZ} = 0,2 \Omega$. Да се одредат

- а) Влезните импеданции на кабелските изводи.
- б) Еквивалентната импеданција на заземјувачкиот систем.
- в) Ефективните вредности на
 - напонот на мрежестиот заземјувач,
 - струјата што истекува во земјата од мрежестиот заземјувач,
 - напонот на заземјувачот на крајот од првата секција на првиот кабелски извод.
- г) Ефективната вредност на струјата што тече во плаштот на вториот кабелски извод.
- д) Со примена на методот за решавање на електрично коло во форма на скала да се определи коефициентот на изнесен потенцијал за првиот кабелски извод.

Решение

а) Влезна импеданција на кабелските изводи

Еквивалентното коло на првиот кабелски извод е прикажано на следната слика. Импеданциите Z_1 и Z_2 се добиени како производ од надолжната импеданција $\underline{z} = (0,4 + j0,8) \Omega/\text{km}$ и должината на двата кабли која изнесува 5 km.



Слика П.9.3.2. Еквивалентна шема на првиот кабелски извод

Влезната импеданција на изводот ќе ја добиеме со редно-паралелно еквивалентирање на елементите во колото. Елементите Z_2 и R_{Z2} се редно поврзани со што ја добиваме импеданцијата Z_{e1} . Потоа, таа е паралелно поврзана со R_{Z1} со што ја добиваме импеданцијата Z_{e2} . На крајот со редната врска од Z_{e2} и Z_1 ја добиваме бараната влезна импе-

данција $\underline{Z}_{v1,1}$.

$$\begin{aligned}\underline{Z}_{e1} &= (2 + j4) + 2 = (4 + j4) \Omega \\ \underline{Y}_{e2} &= \frac{1}{\underline{Z}_{e1}} + \frac{1}{R_{Z1}} = \frac{1}{4 + j4} + \frac{1}{8} = (0,25 - j0,125) \text{ S} \\ \underline{Z}_{e2} &= \frac{1}{\underline{Y}_{e2}} = \frac{1}{0,25 - j0,125} = (3,2 + j1,6) \Omega \\ \underline{Z}_{v1,1} &= \underline{Z}_{e2} + \underline{Z}_1 = (3,2 + j1,6) + (2 + j4) = (5,2 + j5,6) \Omega\end{aligned}$$

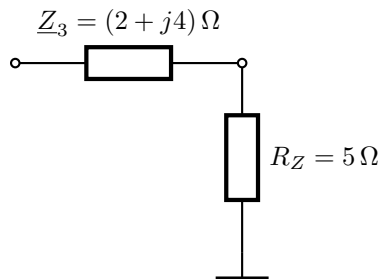
Како што се забележува во горните релации се трудиме да избегнеме операции множење и делење на комплексни броеви. Тоа го постигнуваме така што наместо да пресметаме

$$\underline{Z}_{e2} = \frac{\underline{Z}_{e1} \cdot R_{Z1}}{\underline{Z}_{e1} + R_{Z1}},$$

пресметуваме

$$\underline{Y}_{e2} = \frac{1}{\underline{Z}_{e1}} + \frac{1}{R_{Z1}}, \quad \underline{Z}_{e2} = \frac{1}{\underline{Y}_{e2}},$$

така што имаме само реципрочна вредност од комплексен број што се пресметува доста едноставно.



Слика П.9.3.3. Еквивалентна шема на вториот и третиот кабелски извод

Вториот и третиот кабелски извод се идентични и се значително поедноставни од првиот. Нивната влезна импеданција е редна врска од \underline{Z}_3 и R_Z .

$$\underline{Z}_{v1,2} = \underline{Z}_3 + R_Z = (2 + j4) + 5 = (7 + j4) \Omega.$$

б) Еквивалентна импеданција на заземјувачкиот систем

Еквивалентната импеданција на заземјувачкиот систем ќе ја добиеме како паралелна врска од влезните импеданции на двата вода

$Z_{vl,v}$, влезната импеданција на првиот кабелски извод $Z_{vl,1}$, влезните импеданции на вториот и третиот кабелски извод $Z_{vl,2}$ и отпорноста на мрежестиот заземјувач R_{MZ} . Според тоа имаме

$$\begin{aligned} Z_e &= \frac{1}{\frac{2}{Z_{vl,v}} + \frac{1}{Z_{vl,1}} + \frac{2}{Z_{vl,2}} + \frac{1}{R_{MZ}}} \\ &= \frac{1}{\frac{2}{3,09 + j0,22} + \frac{1}{5,2 + j5,6} + \frac{2}{7 + j4} + \frac{1}{0,2}} = (0,168 + j0,007) \Omega. \end{aligned}$$

в) Напони и струи во колото на заземјувачкиот систем

Струјата која што се инјектира во заземјувачкиот систем е

$$\underline{I}_e = r_f \cdot \underline{I}_{V1} + r_f \cdot \underline{I}_{V2} = r_f \cdot (\underline{I}_{V1} + \underline{I}_{V2}),$$

а нејзината ефективна вредност изнесува

$$I_e = r_f \cdot (I_{V1} + I_{V2}) = 0,68 \cdot (5 + 3) = 5,44 \text{ kA}.$$

Ефективната вредност на напонот на заземјувачот ќе ја добиеме како производ од модулот на влезната импеданција и ефективната вредност на струјата која се инјектира во системот

$$U_{MZ} = Z_e \cdot I_e = \sqrt{0,168^2 + 0,007^2} \cdot 5,44 = 0,915 \text{ kV}.$$

Ефективната вредност на струјата која во земјата истекува преку мрежестиот заземјувач изнесува

$$I_{MZ} = \frac{U_{MZ}}{R_{MZ}} = \frac{0,915}{0,2} = 4,575 \text{ kA}.$$

Напонот на средината на првиот кабелски извод ќе го добиеме со правилото за напонски делител. Имајќи ја превид еквиваленцијата која што ја правевме во точката а) напонскиот делител се состои од редна врска на Z_1 и Z_{e2} , при што бараниот напон е напонот на Z_{e2} . Според тоа, имајќи предвид дека е $Z_{e2} = (3,2 + j1,6) \Omega$ и $Z_1 = (2 + j4) \Omega$, неговата ефективна вредност изнесува

$$\begin{aligned} U_{\text{средина}} &= \frac{Z_{e2}}{|Z_{e2} + Z_1|} \cdot U_{MZ} = \\ &= \frac{\sqrt{3,2^2 + 1,6^2}}{\sqrt{(3,2 + 2)^2 + (1,6 + 4)^2}} \cdot 0,915 = 0,428 \text{ kV}. \end{aligned}$$

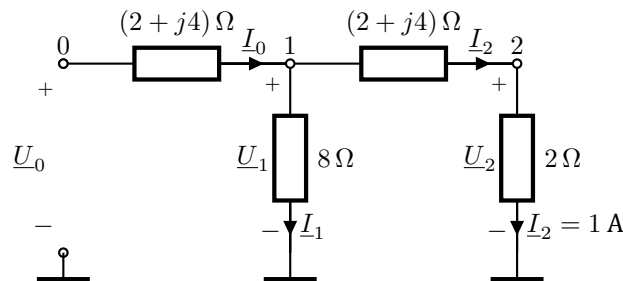
г) Струја во плаштот од вториот кабелски извод

Струјата во плаштот на вториот кабелски извод изнесува

$$I = \frac{U_{MZ}}{Z_{v1,2}} = \frac{0,915}{\sqrt{7^2 + 4^2}} = 0,113 \text{ kA.}$$

д) Коефициент на изнесениот потенцијал на првиот кабелски извод

Електричното коло во форма на скала за првиот кабелски извод го има следниот изглед. Тоа ќе го решиме со постапката која е дадена во примерот 8.9.



Слика П.9.3.4. Решавање на електрично коло во форма на скала

Колото го решаваме од десно кон лево, при што ќе претпоставиме дека е

$$\underline{I}_2 = 1 \text{ A,}$$

со што имаме

$$\underline{U}_2 = 2 \cdot 1 = 2 \text{ V.}$$

Понатаму користејќи ги Кирхофовите закони, обработувајќи една гранка и јазел лево од последно обработениот јазел, можеме да напишеме

Гранка 1-2

$$\underline{U}_1 = 2 + (2 + j4) \cdot 1 = (4 + j4) \text{ V}$$

$$\underline{I}_1 = \frac{4 + j4}{8} = (0,5 + j0,5) \text{ A.}$$

Гранка 0-1

$$\underline{I}_0 = 1 + (0,5 + j0,5) = (1,5 + j0,5) \text{ A}$$

$$\underline{U}_0 = (4 + j4) + (2 + j4) \cdot (1,5 + j0,5) = (5 + j11) \text{ A.}$$

Коефициентот на изнесен потенцијал за јазелот 2 изнесува

$$\underline{k} = \frac{U_2}{U_0} = \frac{2}{5 + j11} = 0,068 - j0,151$$

$$k = \sqrt{0,068^2 + 0,151^2} = 0,166.$$

Со горната постапка лесно може да се пресмета и влезната импеданција на кабелскиот извод

$$\underline{Z}_{vl,2} = \frac{U_0}{I_0} = \frac{5 + j11}{1,5 + j0,5} = (5,2 + j5,6) \Omega.$$

како и напонот на првата трафостаницата користејќи го коефициентот

$$\underline{k}_1 = \frac{U_1}{U_0} = \frac{4 + j4}{5 + j11} = 0,438 - j0,164;$$

$$U_1 = k_1 \cdot U_{MZ} = \sqrt{0,438^2 + 0,164^2} \cdot 0,915 = 0,428 \text{ kV}.$$

□ □ □

9.2.4 Програма за решавање сложени заземјувачки системи

Состојбата во еквивалентното коло на сложен заземјувачки систем наједноставно може да се реши со помош на методот на независни напони кој во матрична форма гласи

$$\underline{Y} \cdot \underline{U} = \underline{J}. \quad (9.5)$$

При тоа \underline{Y} е матрица на адмитанции со димензии $n \times n$, а \underline{U} и \underline{J} се вектори со димензии $n \times 1$ коишто ги содржат непознатите напони и познатите струјни инјекции во јазлите, соодветно. При тоа, напоните се изразени во однос на напонот на референтниот јазел (земјата), а вкупниот број на јазли, не сметајќи го референтниот, изнесува n .

Кирхофовиот закон за струи за сите јазли одеднаш можеме да го напишеме во матрична форма на следниот начин

$$\underline{J} = \underline{A}^T \cdot \underline{I} \quad (9.6)$$

каде што \underline{A} е матрицата на инциденција, а \underline{I} е векторот со струи на гранките.

Бројот на редици во матрицата \underline{A} е еднаков со бројот на гранки m , додека бројот на колони е еднаков со бројот на јазли n (референтниот

јазел е испуштен). Нејзините елементи имаат вредности $-1, 0$ или 1 при што важи следното

$$A_{ki} = \begin{cases} -1, & \text{ако насоката на гранката } k \text{ е кон јазелот } i, \\ 0, & \text{ако гранката } k \text{ не е поврзана со јазелот } i, \\ 1, & \text{ако насоката на гранката } k \text{ е од јазелот } i. \end{cases}$$

Со помош на матрицата A можеме да ги изразиме напоните на гранките \underline{U}_{GR} преку напоните на јазлите на следниот начин

$$\underline{U}_{GR} = A \cdot \underline{U}. \quad (9.7)$$

Ако ги знаеме напоните на гранките, тогаш преку матрицата на импеданции на гранките \underline{Z}_{GR} , која што е дијагонална матрица чии елементи на главната дијагонала се импеданциите на гранките, можеме да ги пресметаме струите во гранките на следниот начин

$$\underline{I} = \underline{Z}_{GR}^{-1} \cdot \underline{U}_{GR} = \underline{Z}_{GR}^{-1} \cdot A \cdot \underline{U}, \quad (9.8)$$

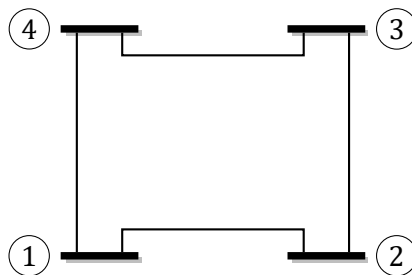
а потоа и инјектираните струи во јазлите користејќи го изразот (9.6)

$$\underline{J} = A^T \cdot \underline{Z}_{GR}^{-1} \cdot A \cdot \underline{U}. \quad (9.9)$$

Споредувајќи го претходниот израз со (9.5) заклучуваме дека за матрицата на адмитанции важи следната релација

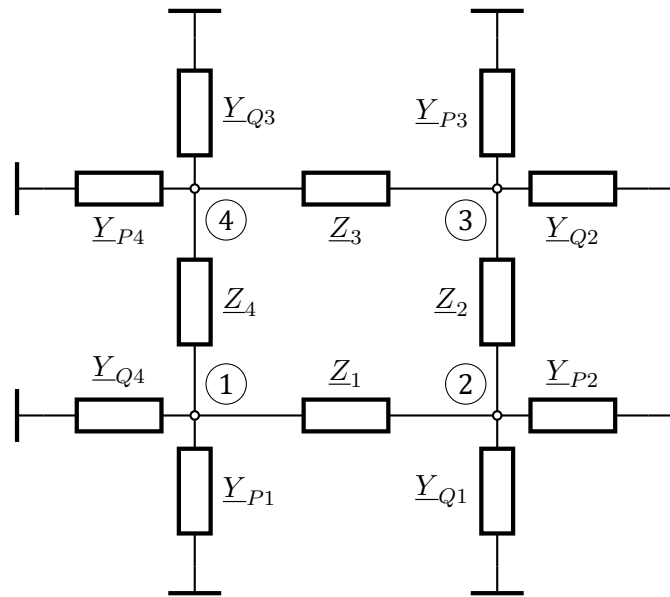
$$\underline{Y} = A^T \cdot \underline{Z}_{GR}^{-1} \cdot A. \quad (9.10)$$

На сликата 9.5 е прикажана една мрежа составена од 4 водови/кабли за кои што се познати параметрите од нивните π -еквивалентни шеми.



Слика 9.5. Едноставна мрежа

Еквивалентното коло на заземјувачкиот систем на мрежата е прикажано на сликата 9.6 каде што се нацртани π -еквивалентни шеми



Слика 9.6. Еквивалентно коло на заземјувачкиот систем на мрежата од сликата 9.5

за сите гранки. Како што се забележува во еквивалентното коло има 12 гранки што е за 3 пати повеќе од бројот на гранки во мрежата.

При анализата на електрични кола вообичаено е два јазла да се споени со една гранка, при што две или повеќе паралелни гранки може да се еквивалентираат со една. Но тука имаме поинаква ситуација. Како што видовме во главите 7 и 8 секој вод или кабел којшто во реалниот систем спојува два јазла е претставен со три гранки од неговата π -еквивалентна шема (Z , Y_P и Y_Q).

Ваквата ситуација на прв поглед создава проблем при формирањето на матрицата на адмитации. Можни се два пристапа, при што овде ќе го користиме вториот пристап.

1. Бројот на гранки во еквивалентното коло да биде 3 пати поголем од бројот на водови/кабли со што матрицата A ќе има 3 пати повеќе колони, а матрицата Z_{GR} ќе има 3 пати повеќе колони и редици. Во овој случај треба да се води сметка за правилно означување на редните и напречните гранки и нивно сместување во двете наведени матрици.
2. Бројот на гранки во еквивалентното коло да биде еднаков со бројот на водови/кабли. Тоа значи дека при формирањето на матрицата на адмитации во матрицата A и Z_{GR} нема директно да ги земеме напречните гранки. Нив ќе ги додадеме одделно што е

лесно изводливо затоа што тие се вклучени само во дијагоналните елементи на матрицата на адмитанции.

Податоците за мрежата ќе ги сместиме во векторите f и t коишто ги содржат индексите на почетните и крајните јазли на гранките, како и векторите Y_r и Y_p кои ги содржат параметрите од еквивалентното коло на гранките при што е $Y_r = 1/Z, Y_p = Y_P = Y_Q$.

Формирањето на матрицата Y преку релацијата (9.10) можеме да го направиме на следниот начин:

```
A = sparse(1:m, f, ones(m, 1), m, n) ...  
  - sparse(1:m, t, ones(m, 1), m, n);  
Y = A' * sparse(1:m, 1:m, Yr) * A ...  
  + sparse(f, f, Yp, n, n) ...  
  + sparse(t, t, Yp, n, n) ...  
  + sparse(1:n, 1:n, 1./zs.Rz);
```

Прво ја формираме матрицата на инциденција A , а потоа ја пресметуваме матрицата Y со помош на релацијата (9.10). Овде матрицата A има m редици, што значи со неа се опфатени само редните гранки од еквивалентните шеми на водовите. Напречните гранки (вкупно $2m$) се додаваат во матрицата Y со помош на наредбата

```
  sparse(f, f, Yp, n, n) ...  
+ sparse(t, t, Yp, n, n) ...
```

при што секоја од наредбите додава по m напречни гранки во дијагоналните елементи што одговараат на почетните јазли (прва наредба) и на крајните јазли на гранките (втора наредба).

На крајот се додаваат отпорностите на заземјувачите во секој од јазлите:

```
+ sparse(1:n, 1:n, 1./zs.Rz);
```

Во неа се користени ретки матрици во Matlab (команда `sparse`) со што се штеди на мемориски простор, а матричните операции влучувајќи го и решавањето на системи линеарни равенки се прават повеќекратно побрзо. Ова е посебно важно во случаите кога работиме со големи матрици, т.е. со големи електроенергетски мрежи.

Во програмата се користи командата `sparse` која што ја има следната синтакса

```
S = sparse(i, j, s, m, n)
```

каде што векторите i , j и s се користат за генерирање на ретка матрица со димензии $m \times n$ за чии елементи важи следното $S(i(k), j(k)) = s(k)$. Векторите i , j и s треба да се со иста должина. Ако во s постојат елементи еднакви на нула тие се игнорираат, а доколку во i и j има дупликати тогаш елементите од s на тие позиции се собираат.

За векторот на инјектирани струи во јазлите имаме

$$\underline{J}_i = \begin{cases} \sum_j x_{f,j} \cdot \underline{I}_{V,j} & i = 1, \\ 0 & i = 2, 3, \dots, n. \end{cases} \quad (9.11)$$

Сумирањето по j , при пресметувањето на струјата \underline{J}_1 , се прави за множеството од водови кои се поврзани со јазелот 1.

Со решавање на системот равенки (9.5) ги пресметуваме напоните на сите јазли, а потоа можеме да ги пресметаме струите во заземјувачите

$$\underline{I}_{Zi} = \frac{\underline{U}_i}{R_{Zi}}, \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad (9.12)$$

како и струите на двата краја од секоја π -шема

$$\begin{aligned} \underline{I}'_k &= \underline{Y}_{rk} \cdot (\underline{U}_i - \underline{U}_j) + \underline{Y}_{pk} \cdot \underline{U}_i, & k = 1, 2, \dots, m, \\ \underline{I}''_k &= \underline{Y}_{rk} \cdot (\underline{U}_i - \underline{U}_j) - \underline{Y}_{pk} \cdot \underline{U}_j, & k = 1, 2, \dots, m. \end{aligned} \quad (9.13)$$

Во последните две равенки со \underline{I}'_k е означена струјата на почетокот на гранката k , а со \underline{I}''_k струјата на нејзиниот крај. Почетниот јазел на гранката k е јазелот i , додека нејзиниот краен јазел е јазелот j . Јазлите i и j се дадени во векторите \underline{f} и \underline{t} и за нив важи $i = f_k$ и $j = t_k$.

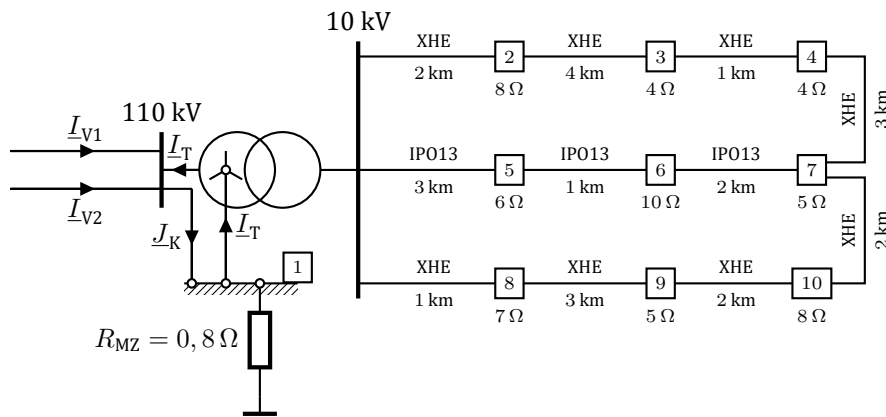
Пример 9.4. Една трансформаторска станица 110/10 kV/kV се напојува од два 110 kV вода со заштитни јажиња, додека на 10 kV страна од неа се напојуваат 3 кабелски изводи 1–2–3–4, 1–5–6–7 и 1–8–9–10. Изводите на крајот, како што е тоа вообичаено во дистрибутивните мрежи, се поврзани меѓусебно со резервни водови (гранките 4–7 и 7–10) кои во нормален работен режим се отворени, но заземјувачките системи им се секогаш директно поврзани.

Должините на сите делници од изводите се прикажани на сликата, а исто така се дадени и отпорностите на заземјувачите на сите ТС 10/0,4 kV/kV, како и отпорноста на мрежестиот заземјувач. Нумерацијата на јазлите од КЗС е прикажана на сликата П.9.4.1.

Познати се и следните податоци:

- Надземните водови за 110 kV имаат влезна импеданција $\underline{Z}_{vl,v} = 2,5 \cdot e^{j9,74^\circ} \Omega$ и $r_f = 0,95 \cdot e^{-j5,6^\circ}$;
- Првиот и третиот кабелски извод се изведени со кабел со изолиран плашт (ХНЕ) со надолжна импеданција $\underline{z} = (0,29 + j0,668) \Omega/\text{km}$. Со ист кабел се изведени и спојниците 4–7 и 7–10.

- Вториот кабелски извод е изведен со кабел со неизолиран плашт (IPO13). Кабелот е со дијаметар $d_k = 4,5 \text{ cm}$ и тој е закопан на длабочина $h = 0,7 \text{ m}$. Надолжната импеданција на кабелот изнесува $z = (0,7 + j2) \Omega/\text{km}$. Специфичната отпорност на земјата по должината на делниците 1 – 5, 5 – 6 и 6 – 7 изнесува $200 \Omega\text{m}$, $100 \Omega\text{m}$ и $150 \Omega\text{m}$ соодветно.



Слика П.9.4.1. Сложен заземјувачки систем

Во високонапонската трафостаница настанала еднофазна куса врска на 110 kV, при што се познати струите на грешка што течат во водовите $I_{V1} = 1000 \text{ A}$ и $I_{V2} = 1500 \text{ A}$. Отпорноста на распростирање на мрежестиот заземјувач на трафостаницата е $R_{MZ} = 0,8 \Omega$. Да се одредат

- Напоните и струите на сите заземјувачи во системот.
- Струите во плаштовите на сите кабли.

Решение

Податоците за системот ќе ги сместиме во m-датотека во форма на функција која што ја дефинира структурата zS која ги има следните полиња

- zs .Zv вектор со влезни импеданции на напојните водови,
- zs .J вектор со инјектирани струи во јазлите кој се пресметува со помош на (9.11) при што се користат податоците за редукионите фактори и струите на водовите кои се дадени во векторите r_f и I_v, соодветно,
- zs .Rz вектор со отпорности на заземјувачите на ТС ВН/СН (прв елемент) и на сите заземјувачи на ТС СН/НН,
- zs .granki матрица со параметрите на π-заменските шеми на сите водови/кабли во СН мрежа. Секоја редица од оваа матрица има по 4 елементи кои одговараат на еден вод/кабел.

Во колоните 1 и 2 се дадени индексите на почетниот и крајниот јазел на водот/кабелот, додека во колоните 3 и 4 се дадени параметрите \underline{Z}_P и \underline{Y}_P . Овде сметаме дека е $\underline{Y}_Q = \underline{Y}_P$.

Во конкретниот пример податоците се дадени следната функција.

programi/sistem/zs_1.m

```

1 function zs = zs_1()
2 zs.Zv = 2.5*exp(1j*9.74/180*pi)*[1 1];
3 zs.J = zeros(10,1);
4 rf = 0.95*exp(-1j*5.6/180*pi)*[1 1];
5 Iv = [1000 1500];
6 zs.J(1) = sum(rf.*Iv);
7 zs.Rz = [0.8 8 4 4 6 10 5 7 5 8]';
8 z = 0.29 + 1j*0.668;
9 zs.granki = [
10 1 2      2*z      0
11 2 3      4*z      0
12 3 4      1*z      0
13 1 5     -40.9057 - 33.4379i  0.7265 - 0.5171i
14 5 6     -2.2525 + 2.9509i  1.2104 - 0.5263i
15 6 7     -17.0354 + 0.0217i  0.8995 - 0.5945i
16 1 8      1*z      0
17 8 9      3*z      0
18 9 10     2*z      0
19 4 7      3*z      0
20 7 10     2*z      0
21 ];

```

Параметрите на π -заменската шема на каблите од типот IPO13 можеме да ги пресметаме со функцијата `neizolian_param` (глава 8). Така на пример за кабелот 1–5 добиваме

```

K>> [~,~,Zp,Yp] = neizolian_param(200,3,0.7,0.045,0.7+2j,inf)
Zp =
-40.9057 -33.4379i
Yp =
0.7265 - 0.5171i

```

За каблите од типот ХНЕ важи $\underline{Y}_P = 0$, додека \underline{Z}_P се добива како производ од z и должината на кабелот. Тоа може да се види во функцијата `zs1`.

Матрицата \underline{Y} ја формираме со функцијата `matrica_y`. Во неа влезен параметар е структурата `zs`, а како излез се добива матрицата \underline{Y} , векторите \underline{f} и \underline{t} со почетните и крајните јазли на гранките, векторите \underline{Y}_r и \underline{Y}_p со редните и напречните параметри од π -заменските шеми на гранките и бројот на јазли n .

Во првиот дел на функцијата `matrica_y` од матрицата `zs.granki` се одделуваат потребните вектори, додека во вториот дел се формира матрицата \underline{Y} според (9.10). При тоа формулата (9.10) се применува за редните елементи од π -заменските шеми, а потоа во дијагоналните елементи на матрицата \underline{Y} се додаваат напречните елементи од π -

заменските шеми и отпорностите на заземјувачите во системот. На крајот, на елементот \underline{Y}_{11} му се додаваат реципрочните вредности на влезните импеданции на напојните водови.

**Програма 9.1. Формирање матрица на адмитанции
за сложен заземјувачки систем
(programi/sistem/matrica_y.m)**

```

1 function [Y,f,t,Yr,Yp,n] = matrica_y(zs)
2 G = zs.granki;
3 [f,t,Yr,Yp] = deal(G(:,1),G(:,2),1./G(:,3),G(:,4));
4 n = max([f;t]); m = size(G,1);
5 A = sparse(1:m, f, ones(m, 1), m, n) ...
6     - sparse(1:m, t, ones(m, 1), m, n);
7 Y = A' * sparse(1:m,1:m,Yr) * A ...
8     + sparse(f, f, Yp, n, n) ...
9     + sparse(t, t, Yp, n, n) ...
10    + sparse(1:n, 1:n, 1./zs.Rz);
11 Y(1,1) = Y(1,1) + sum(1./zs.Zv);
    
```

Пресметката на напоните и струите во заземјувачиот систем се прави со функцијата `resi_zs` во која влезен параметар е името на датотеката со влезните податоци за системот која е дадена во променливата `datoteka`. Како излез од функцијата се добиваат векторите \underline{U} со напоните на сите јазли, \underline{I}_z со струите во заземјувачите и векторите \underline{I}_f и \underline{I}_t со струи во плаштовите на каблите на нивниот почеток и крај.

Функцијата `resi_zs` можеме да ја поделиме на три дела

- ① Вчитување на влезните податоци и формирање на матрицата \underline{Y} со помош на функцијата `matrica_y`,
- ② Пресметка на напоните со решавање на системот равенки (9.5),
- ③ Пресметување на струите во заземјувачите и во плаштовите на двата краја од каблите според (9.12) и (9.13), соодветно.

**Програма 9.2. Пресметка на напони и струи
во сложен заземјувачки систем
(programi/sistem/resi_zs.m)**

```

1 function [U,Iz,If,It] = resi_zs(datoteka)
2 zs = feval(datoteka);
3 [Y,f,t,Yr,Yp] = matrica_y(zs);
4 U = Y\zs.J;
5 Iz = U./zs.Rz;
6 If = Yr.*(U(f)-U(t)) + Yp.*U(f);
7 It = Yr.*(U(f)-U(t)) - Yp.*U(t);
    
```

Бараните напони и струи во заземјувачкиот систем ги пресметуваме на следниот начин

```
>> [U,Iz,If,It] = resi_zs('zs_1');
```

со што ги добиваме резултатите прикажани во долната табела.

Табела П.9.4.1. Решение на сложениот заземјувачки систем

јазел	U (V)	I_Z (A)	гранка	I' (A)	I'' (A)
1	720,8	900,9	1-2	166,0	166,0
2	508,0	63,5	2-3	117,3	117,3
3	209,1	52,3	3-4	70,3	70,3
4	168,2	42,1	1-5	629,0	8,6
5	5,8	1,0	5-6	7,8	2,8
6	2,5	0,3	6-7	3,0	95,2
7	92,5	18,5	1-8	208,7	208,7
8	592,4	84,6	8-9	142,4	142,4
9	313,6	62,7	9-10	93,1	93,1
10	188,7	23,6	4-7	36,5	36,5
/	/	/	7-10	75,5	75,5

Од резултатите се забележува дека напоните на заземјувачите во изводот изведен со кабли IPO13 се занемарливо мали во споредба со другите два извода. Тоа е така поради постоењето на напречните елементи во π -заменската шема кои одведуваат голем дел од струјата во земјата така што потенцијалите кај нив доста опаѓаат. Повисокиот напон на јазелот 7 е поради врските со јазлите 4 и 10 кои се остварени со кабли од типот ХНЕ.

Постапката за решавање која што е применета во овој пример може да се примени и на претходните 2 примера од оваа глава, како и на примерите од главите 7 и 8. Начинот на примена на наведената програма за тие случаи се остава за вежба за читателот.



Пример 9.5. Со примена на матрична постапка да се реши состојбата во колото на заземјувачкиот систем од мрежата анализирана во примерот 8.5. Пресметките да се направат за следните два случаја

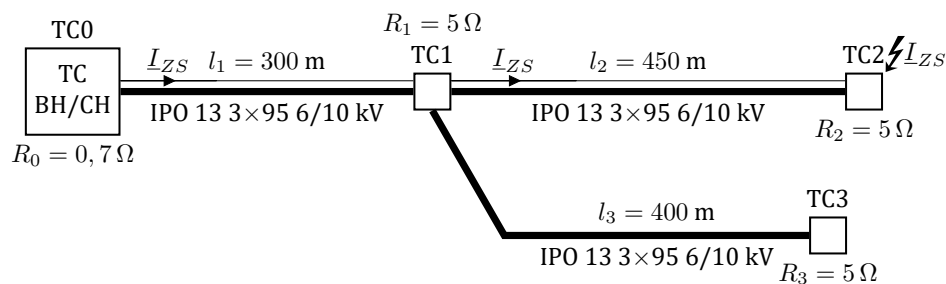
- а) за режим на земјоспој во ТС0 кога струјата на грешка изнесува $\underline{I}_{ZS} = 1000$ A,
- б) за режим на земјоспој настанат кај ТС2 кога струјата на земјоспојот изнесува $\underline{I}_{ZS} = 300$ A.

Редукциониот фактор на сите кабли од мрежата е еднаков и изнесува $r_f = 0,23 \cdot e^{j12^\circ}$.

Податоците за параметрите на колото се дадени во табелата П.9.5.1. Останатите потребни податоци се дадени на сликата П.9.5.1.

Табела П.9.5.1. Параметри на π -заменските шеми на одделните кабелски секции од мрежата

Секција	$\underline{Z}_P (\Omega)$	$\underline{Y}_P (S)$
TC0 – TC1	$0,14034 + j0,65136$	$0,61750 - j0,03790$
TC1 – TC2	$0,08167 + j1,05700$	$0,84507 - j0,10671$
TC1 – TC3	$0,11637 + j0,91395$	$0,77440 - j0,07954$



Слика П.9.5.1. 10 kV кабелска мрежа од примерот 8.5

Решение

За решавање на проблемот ќе ја користиме програмата `resi_zs`, за која треба да подготвиме влезна датотека со податоци за системот. При тоа јазлите означени на сликата како TC0, TC1, TC2 и TC3 се нумерирани со броевите 1, 2, 3 и 4.

а) Режим на земјоспој настанат во TC0

Податоците за системот се дадени во следната функција

programi/sistem/zs_2a.m

```

1 function zs = zs_2a()
2 zs.Zv = inf;
3 zs.J = [1000 0 0 0]';
4 zs.Rz = [0.7 5 5 5]';
5 zs.granki = [
6     1 2 0.14034 + 0.65136i 0.61750 - 0.0379i
7     2 3 0.08167 + 1.05700i 0.84507 - 0.10671i
8     2 4 0.11637 + 0.91395i 0.77440 - 0.07954i
9 ];

```

при што нивното значење е исто како и кај функцијата `zs_1` од претходниот пример.

Во овој случај единствена кситација во колото е струјниот генератор \underline{I}_{ZS} поставен помеѓу јазелот 1 и земјата. Затоа матрицата на

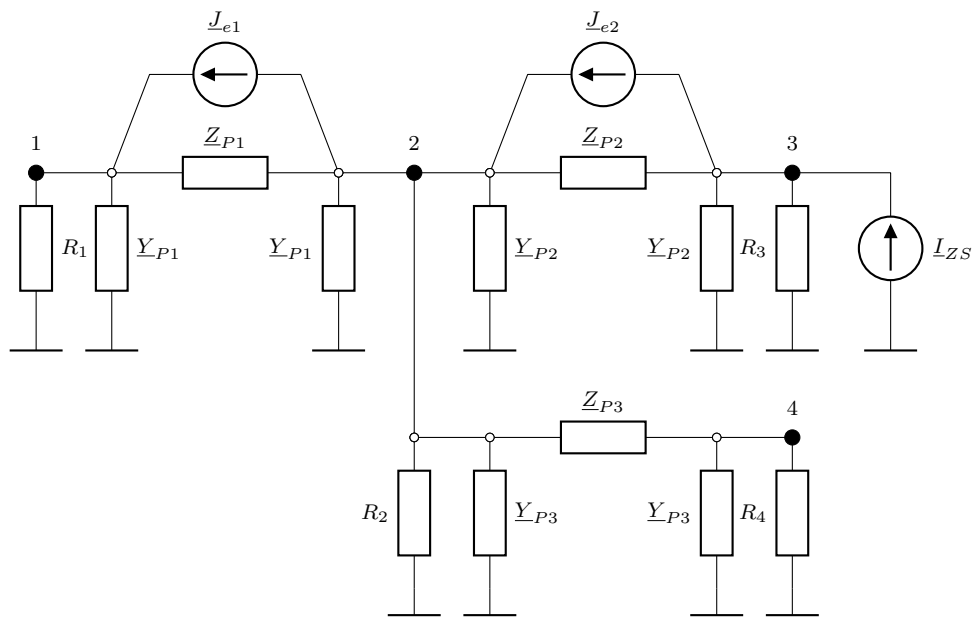
инјектирани струи во јазлите го има следниот облик $z_s \cdot J = [1000 \ 0 \ 0 \ 0]'$.

Решението го добиваме со следните наредби

```
>> [U,Iz,If,It] = resi_zs('zs_2a');
>> U = abs(U)
U =
 353.8094
 117.6691
  72.4670
  79.6319
>> Iz = abs(Iz)
Iz =
 505.4420
  23.5338
  14.4934
  15.9264
```

Може да се констатира дека добиените резултати за напоните и струите се идентични со резултатите добиени во примерот 8.5.

б) Режим на земјоспој настанат во ТС2



Слика П.9.5.2. Заземјувачки систем на кабелска мрежа во режим на земјоспој при ТС2

Ако го нацртаме колото на заземјувачкиот систем аа овој случај, тогаш покрај пасивниот дел од колото којшто се состои од три π -четворополи, ќе се појват уште три струјни генератори. Првиот, со струја I_{ZS} ќе биде приклучен на местото на дефектот (јазел 3), вториот којшто

е резултат на магнетската во првата делница од кабелот, со струја \underline{J}_{e1} ќе биде приклучен помеѓу јазлите 1 и 2 и слично на него, третиот, со струја \underline{J}_{e2} , ќе биде приклучен помеѓу јазлите 2 и 3, како што е тоа прикажано на сликата П.9.5.2.

Во овој случај со три екситации матрицата на инјектирани струи во јазлите \underline{J} ќе го има следниот облик

$$\underline{J} = \begin{bmatrix} \underline{J}_{e1} & -\underline{J}_{e1} + \underline{J}_{e2} & -\underline{J}_{e2} + \underline{I}_{ZS} & 0 \end{bmatrix}^T,$$

каде што се

$$\underline{J}_{e1} = \underline{J}_{e2} = (1 - r_f) \cdot \underline{I}_{ZS} = (232, 51 - j14, 346) \text{ A.}$$

Според тоа, влезните податоци за заземјувачкиот систем ќе ги зададеме на следниот начин

programi/sistem/zs_2b.m

```
1 function zs = zs_2b()
2 zs.Zv = inf;
3 rf = 0.23 * exp(1j*12/180*pi);
4 Izs = 300;
5 Je = (1 - rf)*Izs;
6 zs.J = [Je 0 Izs-Je 0].';
7 zs.Rz = [0.7 5 5 5]';
8 zs.granki = [
9     1 2 0.14034 + 0.65136i 0.61750 - 0.0379i
10    2 3 0.08167 + 1.05700i 0.84507 - 0.10671i
11    2 4 0.11637 + 0.91395i 0.77440 - 0.07954i
12 ];
```

додека решението го добиваме со следните команди

```
>> [U,Iz,If,It] = resi_zs('zs_2b');
>> U = abs(U)'
U =
 84.3082  36.3843  40.3359  24.6229
>> Iz = abs(Iz)'
Iz =
120.4403  7.2769  8.0672  4.9246
```

Констатираме дека резултатите за напоните и струите во овој случај, кога се уважува постоењето на заемните спреги помеѓу фазниот спроводник со струјата на земјоспој \underline{Z}_{ZS} и металните елементи во конструкцијата на каблите низ кои што таа минува, се разликуваат значително во однос на случајот кога тие спреги би биле занемарени. Напоните во јазлите од колото се сега помали што значи дека заемните магнетски спреги имаат благопријатен ефект врз состојбата во заземјувачкиот систем за време на земјоспојот, а со тоа и врз сигурноста од аспект на опасни напони.



10

ПРИМЕРИ ОД РАЗНИ ОБЛАСТИ

Пример 10.1. Заземјувач со должина $l = 10$ m, изработен од бакарно јаже со пресек 50 mm^2 и пречник $d = 9$ mm се наоѓа во неограничена спроводна средина со специфична отпорност $\rho = 100 \Omega\text{m}$. Струјата на одведување во земјата од заземјувачот изнесува $I_Z = 10$ A. Да се пресмета отпорноста на распростирање R_Z и распределбата на потенцијалите во околината заземјувачот. Колкава ќе биде отпорноста R'_Z ако се зголеми пречникот на заземјувачот на вредност $d' = 200$ mm.

Решение

Според релацијата (3.26) отпорноста на распростирање на заземјувачот ќе биде

$$R_Z = \frac{\rho}{2\pi \cdot l} \cdot \ln \frac{2l}{d} = \frac{100}{2\pi \cdot 10} \cdot \ln \frac{2 \cdot 10}{0,009} = 12,265 \Omega.$$

Напонот на заземјувачот во тој случај ќе биде

$$U_Z = R_Z \cdot I_Z = 12,265 \cdot 10 = 122,65 \text{ V}.$$

Потенцијалот φ_M во произволна точка од просторот околу заземјувачот, според (3.21), ќе биде

$$\varphi_M = \alpha_M \cdot I_Z = \frac{\rho \cdot I_Z}{4\pi l} \cdot \ln \frac{R_1 + R_2 + l}{R_1 + R_2 - l},$$

каде што R_1 и R_2 претставуваат растојанија од посматраната точка М до обата краја на електродата.

Од последната релација произлегува заклучокот дека еквипотенцијалните линии на полето околу заземјувачот ќе претставуваат геометриско место на точки за кои важи релацијата

$$\varphi = \frac{\rho \cdot I_Z}{4\pi l} \cdot \ln \frac{R_1 + R_2 + l}{R_1 + R_2 - l} = \text{const.}$$

од каде што следува

$$\begin{aligned} R_1 + R_2 &= \frac{K + 1}{K - 1} \cdot l = \text{const.}; \\ K &= \exp\left(\frac{4\pi l \cdot \varphi}{\rho \cdot I_Z}\right). \end{aligned} \quad (\text{П.10.1.1})$$

Последната релација е одлика на геометриската фигура елипса, што значи дека еквипотенцијалните линии околу заземјувачот (кој впрочем, според теоријата изложена во точката 3.2, се апроксимира со еден обртен елипсоид) се, исто така, елипси. Од причини на целосна осна симерија, еквипотенцијалните површини во овој случај ќе бидат исто така обртни елипсоиди.

Фокусите на елипсата се во крајните точки од заземјувачот. Ако нив ги означиме со $(-c, 0)$ и $(c, 0)$, каде што е $c = l/2$, и ако равенката на елипсата ја напишеме во облик

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1,$$

тогаш важат следните релации

$$\begin{aligned} R_1 + R_2 &= 2a, \\ b^2 &= a^2 - c^2. \end{aligned}$$

Според тоа, имајќи ја превид релацијата (П.10.1.1), за параметрите на елипсата добиваме

$$\begin{aligned} a &= \frac{K + 1}{K - 1} \cdot \frac{l}{2}, \\ b &= \frac{2\sqrt{K}}{K - 1} \cdot \frac{l}{2}. \end{aligned}$$

Знаејќи ги параметрите на елипсата нејзините равенки можеме да ги напишеме и на следниот начин

$$\begin{aligned} x &= a \cdot \cos \alpha, \\ y &= b \cdot \sin \alpha, \end{aligned}$$

каде што аголот α се менува од 0° до 360° .

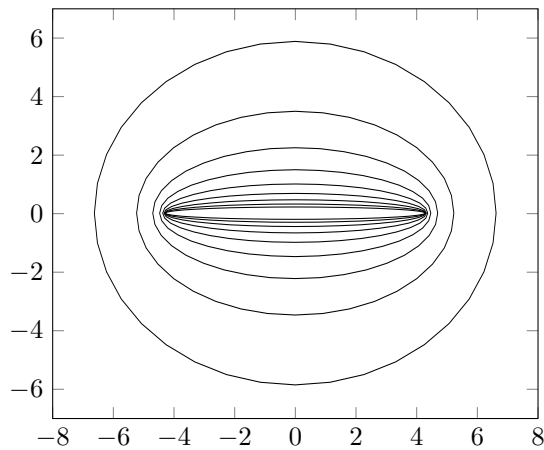
На тој начин се добива фамилијата еквипотенцијални линии – елипси, за разни вредности на потенцијалот φ . Некои од нив, за $\varphi \in \{10\%, 15\%, 20\%, \dots, 50\%\}$ се прикажани на сликата П.10.1.1. Елипсите се нацртани со помош на следната програма.

programi/primeri/primer_1.m

```

1 l = 10; rho = 100; Iz = 10; Uz = 122.65;
2 figure; axis equal; hold on
3 for fi = 10:5:50
4     K = exp(4*pi*l*(fi/100*Uz)/(rho*Iz));
5     a = (K + 1)/(K - 1)*l/2;
6     b = 2*sqrt(K)/(K - 1)*l/2;
7     alfa = (0:10:360)/180*pi;
8     x = a*cos(alfa);
9     y = b*sin(alfa);
10    plot(x,y,'-k');
11 end
12 xlim([-8 8]); ylim([-7 7]);

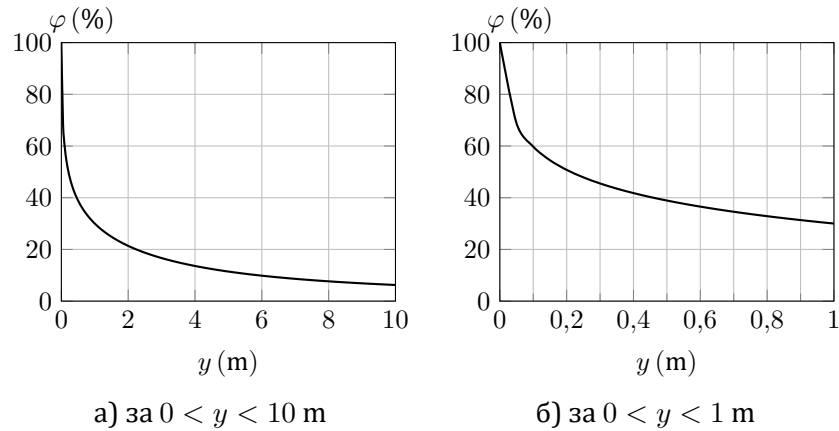
```



Слика П.10.1.1. Еквипотенцијални линии околу хоризонтален заземјувач

Од сликата П.10.1.1 се гледа дека густината на еквипотенцијалните линии е најголема во непосредна близина околу заземјувачот. Дополнителните анализи на зависноста $\varphi(y)_{x=0}$ на потенцијалот долж y -оската со помош на релацијата (П.10.1.1) покажуваат дека таа зависност има облик како на сликата П.10.1.2.

Од сликата П.10.1.2б јасно се гледа дека веќе на растојание $y = 0,1$ m од заземјувачот потенцијалот во околината паѓа на 60% од напонот на заземјувачот U_Z . Тоа значи дека 40% од отпорот со кој земјиштето се спротивставува на одведувањето на струјата отпаѓа на првите 10 cm околу заземјувачот. Од тука произлегува заклучокот дека доколку го зголемиме пречникот на заземјувачот на вредноста $d' = 20$ cm, тогаш потенцијалот на заземјувачот ќе можеме да го спуштиме на вредноста $\varphi = 0,6 \cdot U_Z$, без да дојде до промена на струјата на истекување од заземјувачот и промена на потенцијалите во преостанатиот околени простор.



Слика П.10.1.2. Зависност на потенцијалот по должина на y -оската

Значи со таквото зголемување на пречникот сме совладале 40% од отпорот со кој толо се спротивставува на течењето на струјата, т.е. сме ја намалиле отпорноста на распростирање на заземјувачот за 40%. И навистина, ако го зголемиме пречникот на заземјувачот од $d = 0,9$ cm на вредноста $d' = 20$ cm, тогаш со помош на формулата (3.26) ќе добиеме

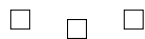
$$R'_Z = \frac{\rho}{2\pi \cdot l} \cdot \ln \frac{2l}{d'} = \frac{100}{2\pi \cdot 10} \cdot \ln \frac{2 \cdot 10}{0,2} = 7,329 \Omega \approx 0,6 \cdot R_Z.$$

Ваквиот начин на намалување на отпорноста на заземјувачите со зголемување на нивниот пречник е скап и непрактичен. Но од оваа анализа произлегува еден многу важен заклучок. За намалување на отпорноста R_Z на еден заземјувач и постигнување нејзини пониски вредности многу важен фактор е квалитетот на земјиштето во околината на заземјувачот, особено во околината на првите десетина cm околу неговите електроди. Тоа земјиште треба да има мала специфична отпорност ρ и полн контакт со електродите (хумус, просеана земја, ситен просеан песок измешан со земја), т.е. земјата која што се наоѓа во непосреден контакт со електродите на заземјувачите да има ниска вредност на ρ и да биде добро набиена. Следните десетина cm во околината на заземјувачите не се толку влијателни бидејќи според сликата П.10.1.2б на тој дел од земјиштето отпаѓа само 10-тина % од отпорноста на толо. Со натамошното оддалечување од електродите на заземјувачот улогата на квалитетот на земјиштето се намалува сè повеќе. Веќе на растојание y кое е приближно еднакво на половина од должината l на заземјувачот потенцијалот во земјата паѓа на само 10% од напонот U_Z така што понатаму квалитетот на земјиштето скоро и воопшто да не е битен, бидејќи е јасно дека целиот процес на течењето

на струјата I_Z и главното нејзино одведување во просторот се одвива во тој мал дел од просторот околу заземјувачот со димензија која е приближно еднаква на половина од неговата подолжна димензија.

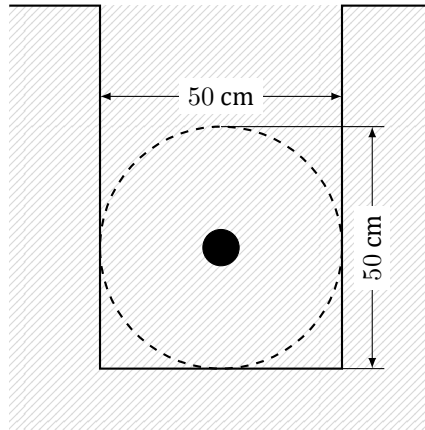
Погоре разгледуваната техника за намалување на отпорноста R_Z на еден заземјувач се применува и на подруг, значително поефикасен начин, со примена на материјали со ниска специфична отпорност, како што е на пример бентонитот чија специфична отпорност ρ се движи во границите од 3 до 8 Ωm . Во недостаток на бентонит, кој е впрочем и доста скап (една вреќа бентонит од 50 kg чини приближно колку една вреќа цемент, т.е. околу 5 €) се применува постапка според која пред поставувањето на електродите во земјата, во ровот каде што тие ќе бидат положени се поставува ситна просеана хумусна земја или глина така што тие да бидат целосно опфатени (опколени) со слој квалитетна земја чија дебелина, според погоре изнесеното, треба да изнесува најмалку 10 cm. Натамошното зголемување на дебелината на слојот квалитетна земја/бентонит, не придонесува во таква мера за подобрување на перформансите на заземјувачите како што тоа го прават првите 10 cm. Така, на пример, од сликата П.10.1.2б јасно се гледа дека ако се усвои дебелина на слојот бентонит или квалитетна земја $\delta = 20$ cm, најмногу што може да се постигне е да се намали отпорноста R'_Z на 50% од својата почетна вредност, додека со дебелина на слојот бентонит од $\delta = 50$ cm ќе постигне намалување на R'_Z за само дополнителни 10%.

Заклучоците изведени во овој пример се општи и важат не само кај хоризонталните туку и кај вертикалните заземјувачи, па дури и кај посложените форми заземјувачи составени од голем број долги линеични електроди какви што, се на пример, мрежестите заземјувачи кај ВН трансформаторски станици, заземјувачите поставени во кабелските ровови и слично



Пример 10.2. Заземјувачот разгледуван во претходниот пример ($l = 10$ m, $d = 9$ mm, $I_Z = 10$ A) е поставен во земјиште со висока специфична отпорност $\rho = 500 \Omega\text{m}$. Да се процени за колку % ќе се намали неговата отпорност на распростирање R_Z ако при положувањето на бакарното јаже во земјата се примени претходно опишаната постапка со употреба на добро спроводна земја чија специфична отпорност изнесува $\rho_1 = 30 \Omega\text{m}$, донесена од друга локација. Во тој случај заземјувачот ќе биде поставен во ров со широчина $D = 50$ cm (колку што изнесува широчината на „раката“ од ровокопачот), како на сликата П.10.2.1, т.е. ќе биде опкружен со слој добро спроводна земја со дебелина $\delta = D/2 = 25$ cm. Каков ефект ќе се постигне ако место земја, за намалување

на отпорноста R_Z се примени бентонит чија специфична отпорност изнесува $\rho = 5 \Omega\text{m}$.



Слика П.10.2.1

Решение

Отпорноста на распространување на заземјувачот во овој случај (неограничена хомогена средина со специфична отпорност $\rho = 500 \Omega\text{m}$), според релацијата (3.26), ќе биде

$$R_Z = \frac{\rho}{2\pi \cdot l} \cdot \ln \frac{2l}{d} = \frac{500}{2\pi \cdot 10} \cdot \ln \frac{2 \cdot 10}{0,009} = 61,325 \Omega,$$

додека напонот на заземјувачот ќе изнесува

$$U_Z = R_Z \cdot I_Z = 61,325 \cdot 10 = 613,25 \text{ V}.$$

Нека вкупната отпорност на распространување на заземјувачот R_Z ја поделиме во два дела – дел R_1 на кој отпаѓа отпорноста со која слојот земја околу заземјувачот со дебелина $\delta = 25 \text{ cm}$ се спротивставува на течењето на струјата и на делот R_2 којшто отпаѓа на преостанатиот дел од просторот околу заземјувачот.

Тогаш врз основа на сликата П.10.1.26 од претходната задача може да се процени (а тоа лесно може и да се пресмета) дека отпорноста R_1 на слојот земја околу заземјувачот со дебелина δ на кој, според сликата П.10.1.26, отпаѓаат приближно 52% од вкупната отпорност R_Z , т.е. $R_1 = 0,52 \cdot 61,325 = 31,89 \Omega$, додека остатокот ќе биде $R_2 = 0,48 \cdot R_Z = 29,44 \Omega$.

Ако околу заземјувачот поставиме слој добро спроводна земја со специфична отпорност $\rho_1 = 30 \Omega\text{m}$ според сликата П.10.2.1, тогаш апроксимирајќи го квадратниот облик на слојот земја со кружен облик

со пречник $D = 2\delta = 50$ cm и занемарувајќи го влијанието на неговиот лик, делот од отпорноста R_1 ќе се намали поради намалувањето на специфичната отпорност ρ , и ќе има нова вредност

$$R'_1 = \rho_1/\rho \cdot R_1 = 30/500 \cdot 31,89 = 1,91 \Omega.$$

Останатиот дел од отпорноста на земјиштето R_2 , ќе остане и понатаму непроменет, т.е. $R_2 = 29,44 \Omega$. Значи вкупната отпорност на распростирње на заземјувачот R'_Z , во новите услови ќе биде

$$R'_Z = R'_1 + R_2 = 1,91 + 29,44 = 31,35 \Omega \approx 0,51 \cdot R_Z,$$

и таа сега ќе биде практично двојно помала во однос на случајот кога заземјувачот би бил закопан директно во земјата без негово положување во слој калитетна земја со мала специфична отпорност.

Доколку место земја со специфична отпорност $\rho_1 = 30 \Omega\text{m}$, се употреби бентонит со специфична отпорност $\rho_2 = 5 \Omega\text{m}$, тогаш првиот дел од отпорот на земјиштето којшто се однесува на слојот бентонит ќе се намали уште повеќе и ќе добие вредност

$$R'_1 = \rho_2/\rho \cdot R_1 = 5/500 \cdot 31,89 = 0,319 \Omega,$$

додека вкупната отпорност R'_Z ќе изнесува

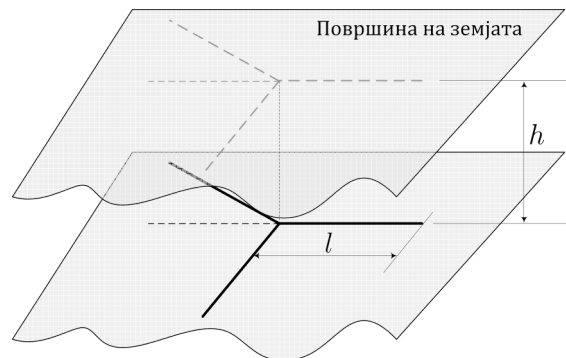
$$R'_Z = R'_1 + R_2 = 0,319 + 29,44 = 29,759 \Omega \approx 0,49 \cdot R_Z$$

Значи ефектот од употребата на скапиот бентонит во овој случај ќе биде незначителен, па според тоа, ќе биде економски неоправдан. Тоа се должи на фактот што намалувањето на вкупната отпорност R'_Z со примената на бентонитот како замена за добро спроводната и ефтина земја е незначително, само за $1,6 \Omega$, или за само 5% во однос на R'_Z . Во случајот земјиштето во кое што се полага заземјувачот има висока специфична отпорност па уделот на отпорноста R_2 во вкупната отпорност на распростирање R_Z е прилично висок, така што во никој случај отпорноста R'_Z нема да може да падне под вредноста R_2 , т.е. под 48% од неговата почетна вредност.

Сепак, бентонитот и понатаму се применува како мерка за намалување на отпорноста на распростирање на заземјувачите и покрај неговата висока цена во однос на алтернативната опција за примена на добро спроводна земја. Но тоа се прави од други причини. Бентонитот се покажал во практиката као материјал кој долго во себе ја задржува влагата (т.е. не доаѓа до сушење на земјиштето, особено околу електродите на заземјувачот и ја држи стабилно неговата отпорност) но се покажал и како извонреден заштитник на металот бидејќи ја спречува неговата корозија а заземјувачот го прави многу подолготраен.



Пример 10.3. Да се пресмета отпорноста на распростирање R_Z на зракаст заземјувач во форма на правилна трикака ѕвезда според слика П.10.3.1, закопан во хомогено тло со специфична отпорност $\rho = 100 \Omega\text{m}$ на длабочина $h = 0,75 \text{ m}$. Краците од заземјувачот се изведени од поцинкувана челична лента FeZn $25 \times 4 \text{ mm}$ ($d = 22 \text{ mm}$) со должина $l = 10 \text{ m}$. Колкав ќе биде коефициентот на искористување на заземјувачот η ? При решавањето на задачата да се користи програмата zaz (глава 3).



Слика П.10.3.1

Решение

Кога еден заземјувач е составен од n еднакви елементи тогаш во иделен случај, кога тие не би имале меѓусебе никакво влијание, вкупната отпорност на распростирање на заземјувачот R_Z би била

$$R_Z = R_1/n, \quad (\text{П.10.3.1})$$

каде што со R_1 е означена отпорноста на распростирање на еден елемент, кога е тој осамен во просторот. Но бидејќи елементите се наоѓаат во просторот на конечни меѓусебни растојанија секој ќе влијае врз останатите – и обратно, така што вкупната отпорност на распростирање на заземјувачот R_Z ќе биде поголема од претходната вредност, добиена со изразот (П.10.3.1). Значи постои, како што се вели заемно „екранирање“ на елементите од заземјувачот поради што елементите од заземјувачот не се целосно „искористени“. Степенот на тоа заемно екранирање се искажува преку т.н. „коефициент на корисно дејство“ η .

Вистинската вредност на отпорноста R_Z на заземјувачот притоа можеме да ја пресметаме со помош на релацијата (10.3)

$$R_Z = \frac{R_1/n}{\eta} = \frac{R_1}{\eta \cdot n},$$

од каде што следи

$$\eta = \frac{R_1}{R_Z \cdot n}. \quad (\text{П.10.3.2})$$

Со помош на програмата `zaz`, многу едноставно може да се определи отпорноста на распростирање R_Z . Втор начин на кој може да се пресмета отпорноста на распростирање на заземјувачот е со помош на следната полуемпирирска формула (видете го примерот 10.9)

$$R_Z = \frac{\rho}{2\pi L_\Sigma} \cdot \left(\ln \frac{L_\Sigma^2}{d \cdot h} + A_k \right); \quad A_k = 0,87; \quad L_\Sigma = 3l.$$

Во случајов, пресметувањето на отпорноста R_Z е извршено со помош на програмата `zaz` и за отпорноста на распростирање на трикраката ѕвезда се добива

$$R_Z = 6,075 \Omega.$$

Сега со помош на (П.10.3.2) можеме да го пресметаме коефициентот на искористување η . Најнапред ќе ја пресметаме отпорноста на распростирање R_1 на еден од краците на трикраката лента, м третирајќи го кракот како хоризонтална лента со должина l и пречник d , закопана на длабочина h

$$R_1 = \frac{\rho}{\pi \cdot l} \cdot \ln \frac{l}{\sqrt{h \cdot d}} = \frac{100}{\pi \cdot 10} \cdot \ln \frac{10}{\sqrt{0,75 \cdot 0,022}} = 13,862 \Omega;$$

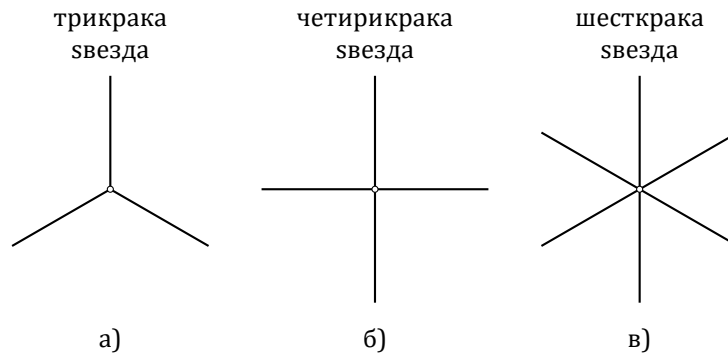
$$\eta = \frac{R_1}{n \cdot R_Z} = \frac{13,862}{3 \cdot 6,075} = 0,761.$$

□ □ □

Пример 10.4. Да се определи зависноста $\eta = f(l)$ на зракастиот заземјувач во форма на правилна

- а) трикрака ѕвезда (слика П.10.4.1а);
- б) четирикрака ѕвезда (слика П.10.4.1б) и
- в) шестокрака ѕвезда (слика П.10.4.1в).

Останатите податоци за заземјувачите се исти како и во преходната задача: $\rho = 100 \Omega\text{m}$; $h = 0,75 \text{ m}$; $d = 22 \text{ mm}$. Пресметките да се прават за должини на краците во интервалот $l \in \{1, 2, \dots, 20\} \text{ m}$.

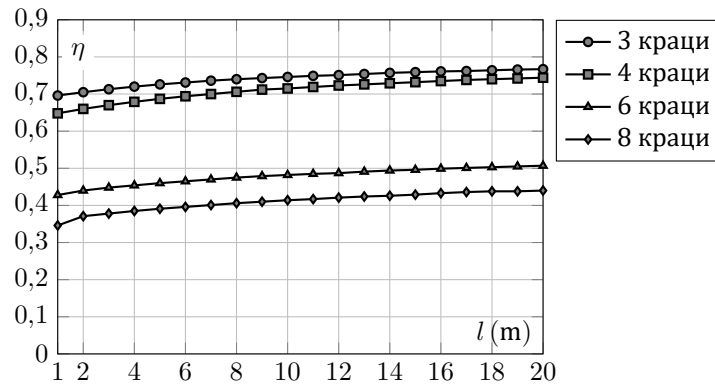


Слика П.10.4.1

Решение

Табела П.10.4.1. Резултати од пресметките со z_{az}

$l(m)$	број на краци во заземјувачот							
	3		4		6		8	
	$R_Z(\Omega)$	η	$R_Z(\Omega)$	η	$R_Z(\Omega)$	η	$R_Z(\Omega)$	η
1	36,842	0,696	29,685	0,648	29,965	0,428	27,761	0,346
2	21,821	0,705	17,495	0,660	17,480	0,440	15,560	0,371
3	15,956	0,713	12,739	0,670	12,711	0,448	11,277	0,378
4	12,733	0,720	10,124	0,679	10,097	0,454	8,932	0,385
5	10,665	0,726	8,447	0,687	8,420	0,460	7,424	0,391
6	9,213	0,731	7,275	0,694	7,245	0,465	6,371	0,396
7	8,133	0,736	6,406	0,700	6,367	0,470	5,590	0,401
8	7,295	0,740	5,733	0,706	5,685	0,475	4,986	0,406
9	6,624	0,743	5,186	0,712	5,144	0,479	4,505	0,410
10	6,075	0,746	4,756	0,715	4,707	0,482	4,111	0,414
11	5,616	0,749	4,388	0,719	4,338	0,485	3,782	0,417
12	5,234	0,751	4,077	0,723	4,031	0,487	3,505	0,421
13	4,891	0,754	3,810	0,726	3,756	0,491	3,266	0,424
14	4,598	0,757	3,577	0,729	3,523	0,494	3,060	0,426
15	4,341	0,759	3,372	0,732	3,317	0,496	2,879	0,429
16	4,113	0,761	3,192	0,735	3,135	0,499	2,707	0,433
17	3,909	0,762	3,031	0,738	2,974	0,501	2,565	0,436
18	3,726	0,764	2,886	0,740	2,828	0,503	2,438	0,438
19	3,560	0,766	2,755	0,742	2,697	0,505	2,334	0,438
20	3,409	0,767	2,637	0,744	2,578	0,507	2,229	0,440



Слика П.10.4.2

На сличен начин како и во претходната задача, со користење на програмата *zaz*, се пресметуваат отпорностите на распростирање на заземјувачите R_Z , а потоа се добиваат и коефициентите на искористување за заземјувачите прикажани на сликата П.10.4.2.

Добиените резултати од пресметките се прикажани во табелата П.10.4.1 и на графикот од слика П.10.4.2, каде што освен за споменатите заземјувачи, прикажани се и резултатите за заземјувач со 8 краци.

Од приложената табела, може да се заклучи дека коефициентот на искористување на трикраката звезда е подобар отколку, на пример, кај шест-краката. Од друга страна пак, распределбата на потенцијалот ќе биде поповолна во случаите кога се работи за заземјувач со повеќе краци.

Во табела П.10.4.2 се сместени резултатите од пресметките, односно отпорностите на распростирање за различни должини на краците и соодветните коефициенти на искористување.

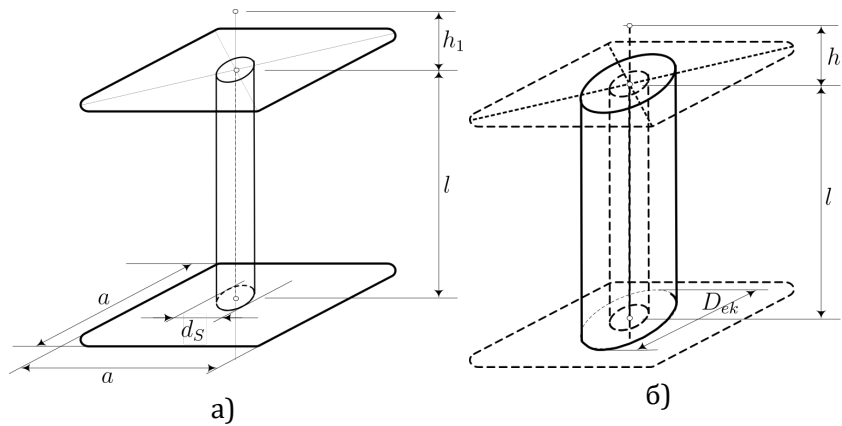


Пример 10.5. Се посматра заземјувачот прикажан на сликата П.10.5.1а со кој што може да се апроксимира една ногара од 110 kV столб со расчленети темели. Прикажаниот заземјувач се состои од две хоризонтално поставени квадратни контури со страница a , изведени од челична поцинкувана лента FeZn 25×4 mm чијшто еквивалентен дијаметар изнесува $d = 22$ mm. Притоа првата е закопана на длабочина h_1 а втората на длабочина h_2 . Арматурата од бетонската конструкција на стопата, пак, може да се апроксимира со вертикална сонда со должина l и еквивалентен пречник $d_S = 150$ mm. Одделните величини што фигурираат на сликата П.10.5.1 ги имаат следните вредности: $a = 1,4$ m; $h_1 = 0,5$ m; $h_2 = 2,5$ m; $l = 2$ m. Заземјувачот е изведен според скицата

од слика П.10.5.1а во хомогено земјиште со специфична отпорност на распостирање $\rho = 100 \Omega\text{m}$.

Потребно е

- а) Да се пресмета отпорноста на распостирање на заземјувачот прикажан на сликата П.10.5.1а;
- б) Да се определи распределбата на струите на одведување на заземјувачот;
- в) Колкав е еквивалентниот пречник D_{ek} на цилиндерот со должина $l_{ek} = h_2 = 2,5 \text{ m}$ со кој што заземјувачот на стопата од сликата П.10.5.1а може да се апроксимира со заземјувач во форма на еквивалентен цилиндер, според скицата од слика П.10.5.1б.



Слика П.10.5.1

а) Со помош на програмата *zaz* на едноставен начин може да се определи отпорноста на распостирање R_Z , која во случајов изнесува $R_Z = 13,592 \Omega$. Внесувањето на елементите од заземјувачот (контурите и сондата) се врши на веќе познатиот начин. Горната контура, поставена на длабочина $h_1 = 0,5 \text{ m}$, е опишана со точките $M_1 \div M_4$, вертикалната сонда со точките M_5 и M_6 и долната контура закопана на длабочина $h_2 = 2,5 \text{ m}$, со точките $M_7 \div M_{10}$. Координатите на точките се прикажани во следната табела.

Табела П.10.5.1. Координати на точките на заземјувачот

Точка	M_1	M_2	M_3	M_4	M_5	M_6	M_7	M_8	M_9	M_{10}
X (m)	0,7	-0,7	-0,7	0,7	0	0	0,7	-0,7	-0,7	0,7
Y (m)	0,7	0,7	-0,7	-0,7	0	0	0,7	0,7	-0,7	-0,7
Z (m)	-0,5	-0,5	-0,5	-0,5	0	-2,5	-2,5	-2,5	-2,5	-2,5

б) Распределбата на струите на одведување по одделните елементи од заземјувачот, која е добиена во решението на zaz , е прикажана во следната табела.

Табела П.10.5.2. Распределба на струите во заземјувачот

Елемент	$M_1 - M_2$	$M_2 - M_3$	$M_3 - M_4$	$M_4 - M_1$	$M_5 - M_6$
$I(\%)$	8,398	8,398	8,398	8,398	21,463
Елемент	$M_7 - M_8$	$M_8 - M_9$	$M_9 - M_{10}$	$M_{10} - M_7$	
$I(\%)$	11,237	11,237	11,237	11,237	

Според распределбата на струите на одведување, може да се види дека 33,5% од вкупната струја се одведува од горната контура, од арматурата на стопата се одведуваат 21,5% а преостанатите 45% од долната контура. Значи ако се откажеме од горната правоаголна контура тогаш би требало да се очекува дека отпорноста на распростирање на стопата ќе се зголеми за најмногу 33,5%. Но улогата на горната контура е да изврши обликување на потенцијалот по површината на земјата во околината на самиот столб и затоа таа најчесто во практиката се изведува и покрај тоа што нејзиниот удел во одведувањето на струјата не е значителен.

в) Отпорноста на распростирање на цилиндарот може да се пресмета според релацијата

$$R_Z = \frac{\rho}{2 \cdot \pi \cdot l_{ek}} \cdot \ln \frac{4 \cdot l_{ek}}{D_{ek}}$$

За заземјувачот е позната неговата отпорност на распростирање и неговата должина, односно $R_Z = 13,592 \Omega$ и $l_{ek} = 2,5 \text{ m}$ а единствена непозната е еквивалентниот пречник D_{ek} . Решението на непознатата D_{ek} гласи

$$D_{ek} = \frac{4 \cdot l_{ek}}{\exp(2\pi \cdot l_{ek} \cdot R_Z / \rho)} = \frac{4 \cdot 2,5}{\exp(2\pi \cdot 2,5 \cdot 13,592 / 100)} = 1,182 \text{ m.}$$

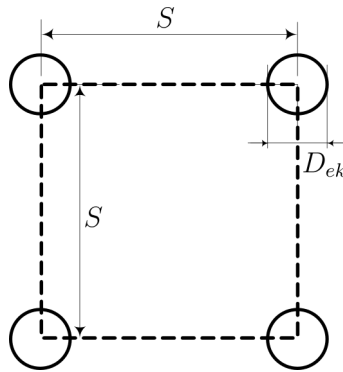
Значи еквивалентниот пречник на цилиндерот изнесува 84,5% од страницата a на контурите, т.е.

$$D_{ek} = 0,845 \cdot a.$$

□ □ □

Пример 10.6. Со програмата zaz да се пресмета зависноста $R_Z = f(S)$ на отпорноста на распростирање на комплетниот заземјувач од

типот А на еден 110 kV столб со расчленети темели (слика П.10.6.1) кај кој секоја стопа, чијшто заземјувач има облик како на сликата од пример 10.5, може да се апроксимира со соодветен заземјувач во форма на цилиндер од со исти димензии на стопите односно на еквивалентниот цилиндер $D_{ek} = 1,182$ m. Потоа користејќи ги резултатите од претходниот пример да се определи зависноста на коефициентот на искористување $\eta = f(S)$ помеѓу стопите од заземјувачот за големини на основото растојание помеѓу стопите во интервалот $S \in \{2,5 \div 6,5\}$ m. Резултатите од пресметките да се прикажат табеларно и на соодветен дијаграм.



Слика П.10.6.1. Заземјувач од типот А на еден 110 kV столб

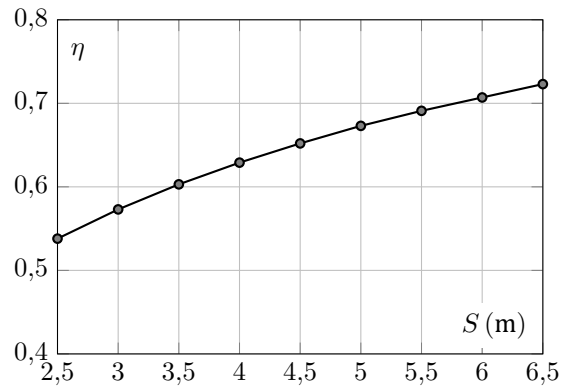
Решение

Пресметувањето на отпорноста на распростирање R_Z на заземјувачот се врши со помош на програмата `zaz`, а потоа, на сличен начин како во претходните примери, се определува коефициентот на искористување η и тоа за различни вредности на растојанието S помеѓу стопите од столбот. Растојанијата кои овде се разгледуваат се оние кои се применуваат и во пракса, имајќи предвид дека тие се помали за пониските столбови, а поголеми ($6 \div 6,5$ m) за повисоките столбови.

Резултатите од пресметките се прикажани во табелата П.10.6.1 и на дијаграмот од сликата П.10.6.2.

Табела П.10.6.1. Зависност $\eta = f(S)$ за заземјувач од типот А

S (m)	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0	6,5
R_Z (Ω)	7,655	7,193	6,836	6,551	6,319	6,126	5,963	5,824	5,704
η	0,538	0,573	0,603	0,629	0,652	0,673	0,691	0,707	0,723



Слика П.10.6.2. Зависност $\eta = f(S)$ за заземјувач од типот А

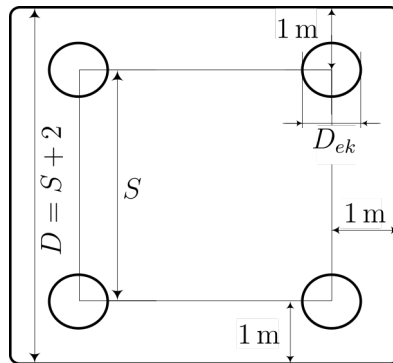
Дијаграмот на сликата П.10.6.2 ја покажува зависноста $\eta = f(S)$, која е добиена од пресметките со помош на програмата `zaz`. Значи, за просечните вредности на растојанието помеѓу стопите S коефициентот на полезно дејство се движи во интервалот од 0,55 до 0,65, со просечна вредност $\eta = 0,6$.

□ □ □

Пример 10.7. Со помош на програмата `zaz` да се пресмета отпорноста на распростирање R_Z на заземјувачот од типот В (слика П.10.7.1), на столбот од еден 110 kV надземен вод за случајот кога меѓуосното растојание на стопите од столбот изнесува $S = 3,5$ m. Колкав е коефициентот на искористување η_{SP} помеѓу стопите и квадратниот прстен што ги опфаќа сите четири стопи. Потоа, со повеќекратна примена на програмата `zaz`, да се определи и зависноста $R_Z = f(S)$ на отпорноста на распростирање на комплетниот заземјувач од типот В од растојанието S помеѓу стопите од столбот.

Решение

Кај заземјувачите од тип В, околу четирите стопи се поставува уште една контура, чија цел е обликување на потенцијалот во околината на столбот. Ваквите заземјувачи се користат на места со лесен пристап за луѓето и животните со цел да се намали ризикот од преголеми напони на допир и чекор при појава на куса врска на надземниот вод. Дополнителниот прстен се поставува на длабочина $h = 0,7 \div 0,8$ m, а со оглед на тоа дека надворешната контура обично се изведува од лента FeZn 30×4 , може да се смета дека еквивалентниот напречен пресек изнесува $d = 22$ mm.



Слика П.10.7.1. Заземјувач од типот В на еден 110 kV столб

Со помош на програмата zaz се пресметува отпорноста на распространување R_Z , која во случајов, кога растојанието помеѓу стопите е $S = 3,5$ m, изнесува $R_Z = 6,072 \Omega$. Коефициентот на искористување η_{SP} во тој случај се добива врз основа на следната релација

$$\eta_{SP} = \frac{R_{4S} \parallel R_P}{R_Z} = \frac{R_{4S} \cdot R_P}{(R_{4S} + R_P) \cdot R_Z} = 0,725$$

каде што со R_{4S} е означена отпорноста на распространување на заземјувачот составен само од 4 стопи, според сликата од примерот 10.5, а со R_P е означена отпорноста на распространување на правоаголниот прстен според сликата П.10.7.1, кога е тој осамен во просторот.

Со програмата zaz, се определува и зависноста $R_Z = f(S)$, а потоа и зависноста $\eta = f(S)$. Резултатите од пресметките се сместени во следната табела, каде што $R_e = R_{4S} \parallel R_P$.

Табела П.10.7.1. Табеларен приказ на зависноста $R_Z = f(S)$ за заземјувач од типот В

S (m)	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0	6,5
R_Z (Ω)	6,919	6,454	6,072	5,749	5,470	5,225	5,003	4,806	4,626
R_{4S} (Ω)	7,655	7,193	6,836	6,551	6,319	6,126	5,963	5,824	5,704
R_P (Ω)	16,079	13,945	12,349	11,105	10,106	9,285	8,596	8,010	7,505
R_e (Ω)	5,186	4,745	4,400	4,120	3,888	3,691	3,521	3,372	3,241
η_{SP}	0,750	0,735	0,725	0,717	0,711	0,706	0,704	0,702	0,701

Од прикажаните резултати може да се заклучи дека вредноста на коефициентот на полезно дејство η_{SP} помеѓу четирите стопи од столбот и надворешниот прстен е прилично стабилна во широк дијапазон на вредности за растојанието помеѓу стопите S и се движи во интервалот

од 0,7 за највисоките столбови со растојание $S = 6,5 \div 0,75$ m кај заземјувачите од тип В кај најниските столбови за кои растојанието S приближно изнесува 2,5 m, со просечна вредност $\eta_{SP} = 0,725$. Тоа ни дава можност на едноставен начин да вршиме проценка на влијанието на надворшниот прстен кај столбовите тип „В“ врз вредноста на отпорноста на распростирање на заземјувачот и без примена на компјутерска пресметка.



Пример 10.8. Столбовите од еден 20 kV надземен вод е предвидено да се заземјуваат со прстенести заземјувачи во форма на круг, изведени од поцинкувана челечна лента FeZn 30×4 ($d = 22$ mm), закопана на длабочина $h = 0,7$ m. Столбовите минуваат низ терени со различни специфични отпорности на тлото ρ : 50, 100, 150, 200 и 300 Ω m. За секој од нив да се пресмета потребниот пречник на кругот D така што отпорноста на распростирање на заземјувачот да изнесува $R_Z = 15 \Omega$.

Решение

Како што е познато, за пресметување на отпорноста R_Z на предвидениот заземјувач постои следната емпириска формула

$$R_Z = \frac{\rho}{\pi^2 \cdot D} \cdot \ln \frac{4 \cdot D}{\sqrt{h \cdot d}}. \quad (\text{П.10.8.1})$$

Да го пресметаме најнапред потребниот пречник на кругот D за случајот кога е $\rho = 100 \Omega$ m, а потоа истата постапка ќе ја повториме и за останатите случаи на специфичната отпорност на тлото ρ .

Како што може да се види од обликот на формулата (П.10.8.1) пресметувањето на потребниот пречник D со помош на оваа формула води кон решавање на една трансцедентна равенка која не го дава директно бараното решение. Затоа проблемот ќе го решиме итеративно, со помош на следната рекурентна формула

$$D_k = \frac{\rho}{\pi^2 \cdot R_Z} \cdot \ln \frac{4 \cdot D_{k-1}}{\sqrt{h \cdot d}}; \quad k = 1, 2, \dots$$

која што произлегува од формулата (П.10.8.1) и во која со D_k е означена вредноста на бараната променлива во k -тата итерација.

Секоја итеративна постапка бара добро почетно решение кое треба да биде доволно блиску до вистинското за да може итеративниот процес брзо и сигурно да заврши. Нека претпоставиме дека тоа почетно решение, коешто ќе го означиме со D_0 , изнесува $D_0 = 1$ m.

Во случајот кога е $\rho = 100 \Omega\text{m}$, итеративниот процес на решавање би изгледал вака

$$D_1 = \frac{\rho}{\pi^2 \cdot R_Z} \cdot \ln \frac{4 \cdot D_0}{\sqrt{h \cdot d}} = \frac{100}{\pi^2 \cdot 15} \cdot \ln \frac{4 \cdot 1}{\sqrt{0,7 \cdot 0,022}} = 2,346 \text{ m};$$

$$D_2 = \frac{\rho}{\pi^2 \cdot R_Z} \cdot \ln \frac{4 \cdot D_1}{\sqrt{h \cdot d}} = \frac{100}{\pi^2 \cdot 15} \cdot \ln \frac{4 \cdot 2,346}{\sqrt{0,7 \cdot 0,022}} = 2,922 \text{ m}$$

$$\vdots$$

После само неколку итерации се добива бараното решение (заокружено на трета децимала)

$$D = 3,113 \text{ m.}$$

На сличен начин се добиваат потребните димензии на пречникот D на заземјувачот и за останатите вредности на специфичната отпорност ρ . Тие се прикажани во следната табела.

Табела П.10.8.1. Зависност $D(\rho)$ кај хоризонтален заземјувач во форма на круг со пречник D

ρ (Ωm)	50	100	150	200	300
D (m)	1,247	3,113	5,187	7,395	12,088

Случајот со $\rho = 100 \Omega\text{m}$ во Matlab можеме да го решиме со примена на функцијата `fsolve` која е наменета за решавање нелинеарни равенки. Тоа го правиме на следниот начин,

programi/primeri/primer_8.m

```

1 rho = 100; h = 0.7; d = 0.022;
2 Rz = 15;
3 f = @(D) rho/(pi^2*D)*log(4*D/sqrt(h*d)) - Rz;
4 D = fsolve(f,1)
    
```

со што добиваме

```

>> primer_8
D =
    3.1130
    
```



Пример 10.9. Зракаст заземјувач во форма на правилна трикрака звезда е изведен од челична поцинкувана лента FeZn $25 \times 4 \text{ mm}^2$ ($d = 18,5 \text{ mm}$), закопан во хомогено тло со специфична отпорност $\rho = 100 \Omega\text{m}$ на длабочина $h = 0,7 \text{ m}$. Сите три краци од звездата имаат иста должина $l = 10 \text{ m}$, а вкупната должина на краците изнесува $L_\Sigma = 3 \cdot l = 30 \text{ m}$. Да се пресмета

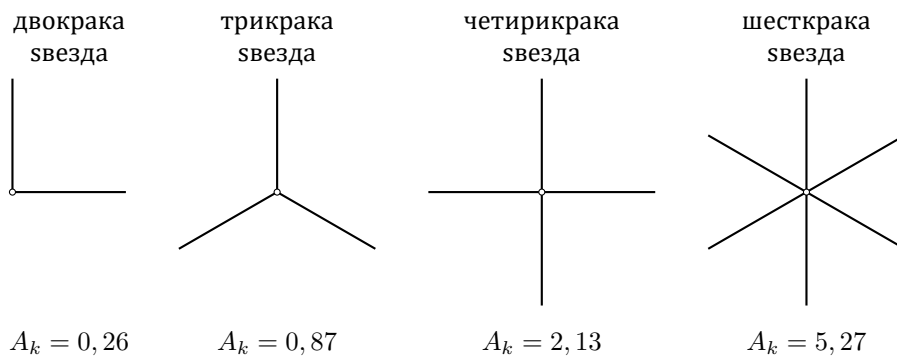
- а) отпорноста на распростирање R_Z и со помош на полуемпириската формула (П.10.9.1);
- б) отпорноста на распростирање R_Z и со помош на програмата zaz;
- в) да се изврши проценка на големината на грешката и да се даде соодветен коментар.

Решение

Денес еден од најчесто применуваните начини за пресметување на отпорноста на распростирање R_Z на заземјувачите примената на некоја компјутерска програма каква што е, на пример, програмата zaz. Но во некои специјални случаи кои што се однесуваат на попростите (елементарни) форми заземјувачи, во кои се вбројува и разгледуваниот заземјувач во форма на правилна трикрака ѕвезда, отпорноста R_Z може да се добие и аналитички, со емпириски или полуемпириски формули, па дури и со изведени изрази за пресметка на заземјувачи базирани на примената на Максвеловите равенки и теоријата на ликови. Позната е, на пример, следната полуемпириска формула [4] за пресметување на отпорноста R_Z на разните видови зракасти, хоризонтално положени симетрични заземјувачи

$$R_Z = \frac{\rho}{2\pi L_\Sigma} \cdot \left(\ln \frac{L_\Sigma^2}{d \cdot h} + A_k \right), \quad (\text{П.10.9.1})$$

која што е вградена дури и во Техничката препорака ТП-9 [12]. Во неа фигурира величината A_k која претставува коефициент што зависи од обликот на зракастиот заземјувач и неговата вредност може да се отчита од следната слика.



Слика П.10.9.1. Зависност на коефициентот A_k од обликот на зракастиот заземјувач

Значи, во конкретниот случај, со помош на формулата (П.10.9.1) ќе добиеме

$$R_Z = \frac{\rho}{2\pi L_\Sigma} \cdot \left(\ln \frac{L_\Sigma^2}{d \cdot h} + A_k \right) =$$

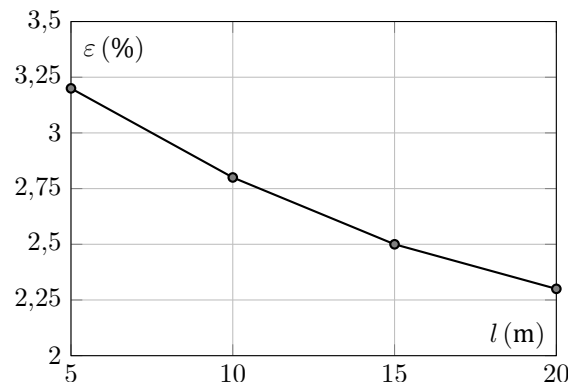
$$= \frac{100}{2\pi \cdot 30} \cdot \left(\ln \frac{30^2}{0,7 \cdot 18,6 \cdot 10^{-3}} + 0,87 \right) = 6,376 \Omega.$$

Доколку истиот проблем го решиме со помош на програмата *zaz* тогаш ќе добиеме $R_Z = 6,204 \Omega$.

Ако истата постапка ја повториме и за други вредности на должината на краците l , ќе ги добиеме следните резултати:

Табела П.10.9.1. Зависност $R_Z(l)$ кај хоризонтален заземјувач во форма на трикрака ѕвезда

l (m)	5	10	15	20
R_Z (Ω) според (П.10.9.1)	11,267	6,376	4,536	3,554
R_Z (Ω) според <i>zaz</i>	10,923	6,204	4,427	3,474
Грешка (%)	3,2	2,8	2,5	2,3



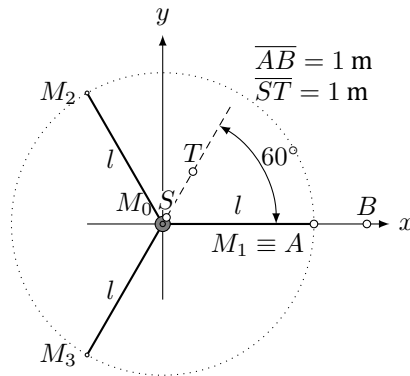
Слика П.10.9.2. Зависност на грешката од должината на краците на ѕвездата

Од табелата и од дијаграмот прикажан на сликата П.10.9.2 можеме да заклучиме дека, кога се работи за хоризонтален заземјувач во форма на трикрака ѕвезда, емпириската формула (П.10.9.1) дава резултати со сосема слични со оние добиени со програмата *zaz* и кои можеме да ги сметаме за „точни“. Значи, точноста на изразот (П.10.9.1) е сосема задоволителна.

□ □ □

Пример 10.10. Зракаст заземјувач во форма на правилна трикрака ѕвезда (слика П.10.10.1) е изведен од челична поцинкувана лента FeZn $25 \times 4 \text{ mm}^2$ ($d = 18,5 \text{ mm}$), закопан во хомогено тло со специфична отпорност $\rho = 100 \Omega\text{m}$ на длабочина $h = 0,7 \text{ m}$. Сите три краци од ѕвездата имаат иста должина $l = 10 \text{ m}$, а вкупната должина на краците изнесува $L_\Sigma = 3 \cdot l = 30 \text{ m}$. Од заземјувачот се одведува струја на грешка $I_Z = 60 \text{ A}$. Да се пресмета

- отпорноста на распростирање R_Z и напонот на заземјувачот U_Z ;
- најголемата потенцијална разлика на допир $E_{d,\max}$ и чекор $E_{c,\max}$, во (V) и во (%) од напонот на заземјувачот U_Z ;
- распределбата на потенцијали по површината од земјата $\varphi(x)$ по должината на x -оската.



Слика П.10.10.1. Заземјувач во форма на трикрака ѕвезда и карактеристични точки

Табела П.10.10.1. Координати на одделните точки од заземјувачот

Точка	x (m)	y (m)	z (m)
M_0	0,00	0,00	-0,70
M_1	10,00	0,00	-0,70
M_2	-5,00	8,66	-0,70
M_3	-5,00	-8,66	-0,70
T	0,55	0,95	0,00
A	10,00	0,00	0,00
B	11,00	0,00	0,00

Решение

а) Пресметка на отпорноста на распростирање R_Z и напонот U_Z

Врз основа на пресметките изведени во претходната задача, за отпорноста на распростирање се добива

$$R_Z = 6,204 \Omega,$$

додека за напонот на заземјувачот ќе добиеме

$$U_Z = R_Z \cdot I_Z = 6,204 \cdot 60 = 372,4 \text{ V}.$$

б) Пресметка на најголемите потенцијални разлики $E_{d,\max}$ и $E_{c,\max}$.

Ќе претпоставиме дека објектот што се заземјува е армирано-бетонски столб со пречник $d_S = 0,2 \text{ m}$. Во тој случај $E_{d,\max}$ ќе го добиеме како разлика помеѓу потенцијалот на столбот $\varphi_S = U_Z$ и потенцијалот φ_T во точката T која што се наоѓа на растојание од најмногу 1 m од габаритот на заземјениот објект и во која се има апсолутен минимум. По логика на нештата таквата точка може да биде само точка која лежи на некоја од симетралите од аглите и која се наоѓа на растојание $r = d_S/2 + 1 = 1,1 \text{ m}$ од оската на столбот. Нека е тоа точката T со координати $x_T = r \cdot \cos \pi/3 = 0,55 \text{ m}$, $y_T = r \cdot \sin \pi/3 = 0,953 \text{ m}$ и $z_T = 0$. Во тој случај потенцијалот φ_T во таа точка ќе го добиеме како суперпозиција од потенцијалите што ги создаваат сите три краци од заземјувачот и нивните ликови. Бидејќи од причини на симетрија струите на одведување од секој од краците на заземјувачот се исти, т.е. $I_1 = I_2 = I_3 = I_Z/3 = 20 \text{ A}$, ќе добиеме

$$\varphi_T = \sum_{j=1}^3 r_{jT} \cdot I_j + \sum_{j=1}^3 r'_{jT} \cdot I_j = 2 \cdot \sum_{j=1}^3 r_{jT} \cdot I_j = 2 \cdot (I_Z/3) \cdot \sum_{j=1}^3 r_{jT},$$

каде што со r_{jT} е означена меѓусебната отпорност помеѓу елементот j од заземјувачот и точката. Нејзината вредност, во согласност со релацијата (3.21) ќе биде

$$r_{jT} = \alpha_{jT} = \frac{\rho}{4\pi l_j} \cdot \ln \frac{R_{1T} + R_{2T} + l_j}{R_{1T} + R_{2T} - l_j}.$$

Во оваа релација со R_{1T} е означено растојанието помеѓу почетокот од елементот j и точката, додека со R_{2T} е означено растојанието помеѓу крајот од елементот j и точката.

Нека со M_0 ја означиме точката која што е заедничка за сите три елементи од заземјувачот, а со M_1 , M_2 и M_3 ги означиме точките што

лежат на спротивните краишта од секој од елементите $j \in \{1, 2, 3\}$, како што е тоа прикажано на сликата П.10.10.1. Тогаш, во согласност со оваа слика, координатите на точката M_2 , на пример, ќе бидат

$$\begin{aligned}x_{M_2} &= l \cdot \cos(\pi/3) = 10 \cdot \cos(\pi/3) = -5 \text{ m}; \\y_{M_2} &= l \cdot \sin(\pi/3) = 8,66 \text{ m}; \\z_{M_2} &= -h = -0,7 \text{ m}.\end{aligned}$$

На сличен начин ги определуваме и координатите на преостанатите точки од заземјувачот, Тие се прикажани во табелата П.10.10.1.

Растојанијата R_{1T} и R_{2T} од точката до обата краја на елементот j ќе се добијат со примена на општата формула за растојание R_{pq} помеѓу две точки, P и Q

$$R_{pq} = \sqrt{(x_q - x_p)^2 + (y_q - y_p)^2 + (z_q - z_p)^2}.$$

Во оваа општа формула со (x_p, y_p, z_p) се означени координатите на првата точка P, додека со (x_q, y_q, z_q) се означени координатите на втората точка Q.

На тој начин, на пример, за растојанието R_{0T} помеѓу точките M_0 и T ќе добиеме

$$R_{0T} = \sqrt{(0,55 - 0)^2 + ((0,95 - 0)^2 + (0 + 0,7)^2)} = 1,30 \text{ m},$$

додека за растојанието R_{1T} помеѓу точките M_1 и T ќе добиеме

$$R_{1T} = \sqrt{(0,55 - 10)^2 + (0,95 - 10)^2 + (0 + 0,7)^2} = 9,52 \text{ m}.$$

Слично се добиваат и останатите растојанија R_{2T} и R_{3T} помеѓу точката T и точките M_2 и M_3

$$R_{2T} = \sqrt{(0,55 - 5)^2 + (0,95 - 8,66)^2 + (0 + 0,7)^2} = 8,93 \text{ m},$$

$$R_{3T} = \sqrt{(0,55 + 5)^2 + (0,95 + 8,66)^2 + (0 + 0,7)^2} = 11,12 \text{ m}.$$

Сега можеме да го пресметаме парцијалниот потенцијал $\varphi_T(1)$ што го создава првиот елемент од заземјувачот ($j = 1$) во точката T

$$\varphi_T(1) = \frac{\rho \cdot I_Z}{4\pi l} \cdot \ln \frac{R_{0T} + R_{1T} + l}{R_{0T} + R_{1T} - l} = \frac{100 \cdot 20}{4\pi \cdot 10} \cdot \ln \frac{1,3 + 9,52 + 10}{1,3 + 9,52 - 10} = 51,48 \text{ V}.$$

Парцијалниот потенцијал $\varphi_T(1')$ што го создава ликот на првиот елемент од заземјувачот ($j = 1'$) во точката T, од причини на симетрија ќе биде ист со претходниот, т.е.

$$\varphi_T(1') = \frac{\rho \cdot I_Z}{4\pi l} \cdot \ln \frac{R_{0'T} + R_{1'T} + l}{R_{0'T} + R_{1'T} - l} = \frac{100 \cdot 20}{4\pi \cdot 10} \cdot \ln \frac{1,3 + 9,52 + 10}{1,3 + 9,52 - 10} = 51,48 \text{ V}.$$

На сличен начин се наоѓаат и парцијалните потенцијали создадени од останатите елементи на заземјувачот. Потоа со суперпозиција се добива потенцијалот од сите заземјувачи.

$$\begin{aligned}\varphi_T(2) = \varphi_T(2') &= \frac{\rho \cdot I_z}{4\pi l} \cdot \ln \frac{R_{0T} + R_{2T} + l}{R_{0T} + R_{2T} - l} = \\ &= \frac{100 \cdot 20}{4\pi \cdot 10} \cdot \ln \frac{1,3 + 8,93 + 10}{1,3 + 8,93 - 10} = 71,25 \text{ V}; \\ \varphi_T(3) = \varphi_T(3') &= \frac{\rho \cdot I_z}{4\pi l} \cdot \ln \frac{R_{0T} + R_{3T} + l}{R_{0T} + R_{3T} - l} = \\ &= \frac{100 \cdot 20}{4\pi \cdot 10} \cdot \ln \frac{1,3 + 11,12 + 10}{1,3 + 11,12 - 10} = 35,43 \text{ V}; \\ \varphi_T &= 2 \cdot [\varphi_T(1) + \varphi_T(2) + \varphi_T(3)] = \\ &= 2 \cdot (51,48 + 71,25 + 35,43) = 316,32 \text{ V}.\end{aligned}$$

Сега можеме да ја пресметаме најголемата потенцијална разлика на допир

$$E_{d,\max} = \varphi_S - \varphi_T = U_Z - \varphi_T = 372,24 - 316,32 = 55,92 \text{ V},$$

или

$$E_{d,\max} \% = \frac{E_{d,\max}}{U_Z} \cdot 100 = \frac{55,92}{372,24} \cdot 100 = 15\%.$$

За пресметување на најголемата потенцијална разлика на чекор $E_{c,\max}$, по логика на нештата, оваа разлика треба да ја бараме или во правец на x -оската, помеѓу точките A и B или, пак, во правец на симетралата на аголот помеѓу првиот и вториот елемент ($\alpha = \pi/3$) негде во близината на координатниот почеток. Значи, потребно ќе биде да се пресметаат потенцијалите во четири точки, од кои две се точките A и B , што лежат на x -оската (слика П.10.10.1).

Потенцијалите φ_A и φ_B во овие точки се пресметуваат на сосема идентичен начин како и во претходниот случај со точката. На тој начин за потенцијалите во овие две точки добиваме

$$\begin{aligned}\varphi_A &= 2 \cdot \sum_{j=1}^3 \varphi_A(j) = 106,94 + 34,51 + 24,41 = 165,86 \text{ V}; \\ \varphi_B &= 2 \cdot \sum_{j=1}^3 \varphi_B(j) = 73,07 + 31,93 + 22,69 = 127,69 \text{ V}; \\ E_{AB} &= \varphi_A - \varphi_B = 165,86 - 127,69 = 38,17 \text{ V}; \\ E_{AB} \% &= \frac{E_{AB}}{U_Z} \cdot 100 = \frac{38,17}{372,24} \cdot 100 = 10,3\%.\end{aligned}$$

Точните пресметки покажуваат дека најголемата потенцијална разлика на чекор се има во правец на симетралата на аголот помеѓу првиот и вториот елемент ($\alpha = \pi/3$), помеѓу точките T_1 и T_2 кои што се наоѓаат на растојание 0,5 и 1,5 m од координатниот почетокот (види слика П.10.10.2) и изнесува

$$E_{T_1-T_2} = \varphi_{T_1} - \varphi_{T_2} = 308 - 256 = 52 \text{ V}$$

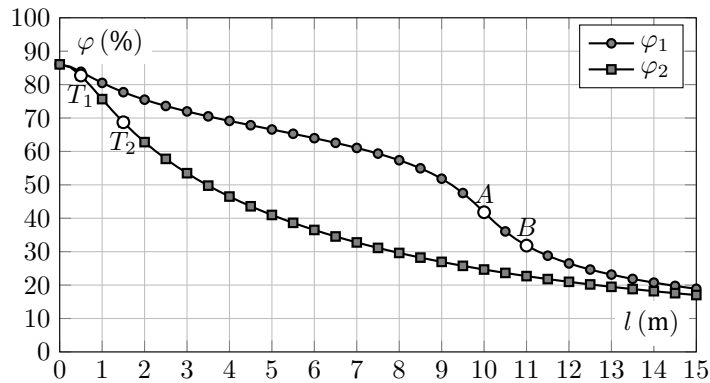
$$E_{T_1-T_2}\% = \frac{E_{T_1-T_2}}{U_Z} \cdot 100 = \frac{52}{372,24} \cdot 100 = 14\%.$$

Според тоа најголемата потенцијална разлика на чекор за овој заземјувач ќе биде

$$E_{c,max} = \varphi_{T_1} - \varphi_{T_2} = 308 - 256 = 52 \text{ V}; \quad (E_{c,max}\% = 14\%).$$

в) Пресметка на распределбата на потенцијалите по должината на x -оската

Ако постапката за пресметка на потенција во точка на површината од земјата ја повториме повеќе пати за доволен број точки на површината од земјата по должината на x -оската ќе ја добиеме кривата φ_1 , прикажана на сликата П.10.10.2. На истата слика е прикажана и кривата φ_2 која ја претставува распределбата на потенцијалите по површината од земјата по должината на симетралата од правата што ги поврзува точките M_0 и T . Пресметките се извршени со помош на програмата zaz.



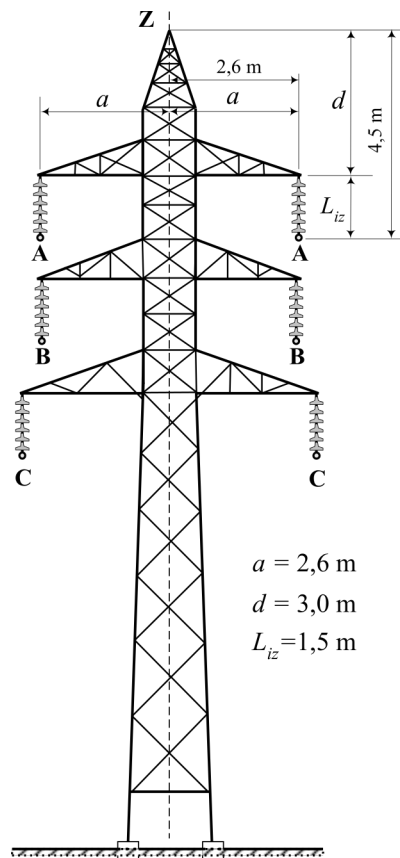
Слика П.10.10.2. Распределба на потенцијалите по површината од земјата

□ □ □

Пример 10.11. На сликата П.10.11.1 е прикажан изгледот на главата од двосистемскиот 110 kV надземен вод преку кој што се напојува со

електрична енергија рудникот Суводол во РЕК Битола. Водот е изведен со спроводници $2 \times 3 \times \text{Al}/\check{\text{C}} 240/40 \text{ mm}^2$ и со заштитно јаже тип Fe II 50 mm^2 . Да се пресмета редуциониот фактор r_f на овој вод. Колкава емс \underline{E}_r се индуцира во еден распон од 300 m при течење на струја на еднофазна куса врска од 1 kA во еден од најгорните фазни спроводници.

Решение



Слика П.10.11.1

Редуциониот фактор на еден надземен вод се дефинира со помош на изразот

$$r_f = 1 - \frac{z_m}{z_s} \quad (\text{П.10.11.1})$$

Тој ни кажува колкав дел од струјата I_{1KV} на еднофазна куса врска што тече по посматраниот вод кон местото на грешката се враќа по заштитното јаже, назад кон изворите од системот поради постоењето на

заемна индуктивна спрега помеѓу фазниот спроводник по кој што тече струјата на грешка и заштитното јаже.

Во формулата (П.10.11.1) се воведени следните означувања

r_f редукионен фактор на водот, кој што претставува бездимензионален комплексен број;

z_m меѓусебна импеданција по единица должина помеѓу фазниот спроводник и заштитното јаже;

z_s сопствена импеданција по единица должина на заштитното јаже.

Импеданциите по единица должина z_m и z_s , според [2], се пресметуваат со помош на Карсоновиот модел, со помош на следните релации

$$z_s = r_z + \frac{1000 \cdot \rho_{Fe}}{S_{Fe}} + j \left(0,1445 \cdot \log \frac{D_e}{r_{z,j}} + 0,0157 \cdot \mu_r \right),$$

$$z_m = r_z + j \cdot 0,1445 \cdot \log \frac{D_e}{D_m},$$

каде што е

r_z еквивалентната отпорност на повратниот пат на струјата во земјата $r_z = 0,05 \Omega/\text{km}$;

D_{ek} еквивалентната длабочина на повратниот пат на струјата во земјата, којшто се пресметува според релацијата (6.4) и кој за $\rho = 100 \Omega\text{m}$ изнесува $D_{ek} = 930,6 \text{ m}$;

ρ_{Fe} специфична отпорност по единица должина на челикот од којшто е изработено заштитното јаже, при што за споменатиот тип челик Fe II тој изнесува $\rho_{Fe} = 0,21 \Omega/\text{m}$;

$r_{z,j}$ радиус (полупречник) на заштитното јаже, ($r_{z,j} = 4,5 \text{ mm}$);

S_{Fe} пресек на заштитното јаже ($S_{Fe} = 49,48 \text{ mm}^2$);

μ_r релативна магнетска пермиабилност на заштитното јаже ($\mu_r = 30$ за заштитно јаже во заситена магнетска состојба);

D_m растојание помеѓу заштитното јаже и фазниот спроводник во кој тече струјата на кусата врска.

Ако претпоставиме дека до грешка дошло во најгорната фаза, тогаш, според сликата П.10.11.1 ($a = 2,6 \text{ m}$; $d = 3,0 \text{ m}$; $L_{iz} = 1,5 \text{ m}$ - должина на изолаторскиот синџир), ова растојание ќе изнесува

$$D_m = \sqrt{a^2 + (d + L_{iz})^2} = \sqrt{2,6^2 + (3 + 1,5)^2} = 5,2 \text{ m}.$$

Сопствената импеданција по единица должина на заштитното јаже се пресметува со помош на изразите (6.3.а) и (6.3.б) и таа изнесува

$$z_s = z = \left(0,05 + \frac{1000 \cdot \rho_{Fe}}{S_{Fe}} \right) + j \left(\log \frac{2 \cdot D_e}{d_{z,j}} + 0,0157 \cdot \mu_r \right) =$$

$$= (4,24 + j1,24) \Omega/\text{km}.$$

или

$$\underline{z}_s = 4,418 \cdot e^{j16,3^\circ} \Omega/\text{km}.$$

За меѓусебната импеданција \underline{z}_m се добива

$$\underline{z}_m = 0,308 \cdot e^{j80,7^\circ} \Omega/\text{km}.$$

Со замена на добиените вредности за \underline{z}_m и \underline{z}_s во (П.10.11.1) за редуциониот фактор на водот добиваме

$$\frac{\underline{z}_m}{\underline{z}_s} = \frac{0,308 \cdot e^{j80,7^\circ}}{4,418 \cdot e^{j16,3^\circ}} = 0,07 \cdot e^{j64,4^\circ},$$

$$\underline{r}_f = 1 - \frac{\underline{Z}_m}{\underline{Z}_s} = (0,9706 - j0,06241) = 0,97623 \cdot e^{-j3,68^\circ}.$$

Во еден распон со должина $a = 300 \text{ m}$ во заштитното јаже ќе се индуцира емс \underline{E}_r под дејство на струјата на кусата врска I_{1KV} , таа изнесува

$$\underline{E}_r = \underline{Z}_m \cdot I_{1KV} = \underline{z}_m \cdot a \cdot I_{1KV},$$

од каде што се добива

$$E_r = 0,308 \cdot 0,3 \cdot 1 = 0,0924 \text{ kV} \equiv 92,4 \text{ V}.$$

□ □ □

Пример 10.12. Да се пресмета отпорноста на распростирање R_Z на долг линеичен заземјувач изведен со бакарно јаже со должина $l = 200 \text{ m}$, пречник $d = 7,5 \text{ mm}$ и пресек $S = 35 \text{ mm}^2$, закопано во земја со специфична отпорност $\rho_z = 100 \Omega\text{m}$ на длабочина $h = 0,7 \text{ m}$. Потоа да се пресмета влезната импеданција (т.е. „импеданција на заземјување“) на истото тоа јаже третирано како долг заземјувач со распределени параметри, водејќи притоа сметка не само за неговата активна одводност $G = g \cdot l$ туку и за постоењето на неговата надолжна импеданција $\underline{z} = r + jx$. Колкава е грешката во добиените резултати за големината на струјата на одведување од заземјувачот ако тој се третира приближно, како концентриран заземјувач.

Решение

Отпорноста на распростирање линеична заземјувачка електрода во форма на долга жица, јаже или лента, со должина l и пречник d ($l \gg d$), закопана на длабочина h во земја со специфична отпорност ρ_z се пресметува со помош на познатата формула

$$R_Z = \frac{\rho_z}{\pi \cdot l} \cdot \ln \frac{l}{\sqrt{h \cdot d}}. \quad (\text{П.10.12.1})$$

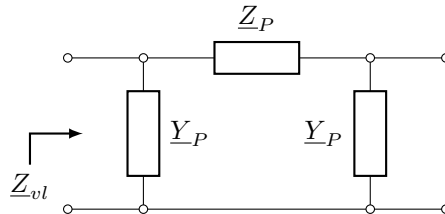
Таа базира на претпоставката дека електродата е идеално спроводна и дека напонот по целата нејзина должина е ист, т.е. константен. Затоа таа дава добри резултати за релативно куси електроди со должина од редот на големина од стотина метри. За поголеми должини, поради постоењето на активна и индуктивна отпорност и течењето на струја долж електродата, напонот веќе не е насекаде ист па затоа се јавува грешка, т.е. таа ќе даде приближен резултат. Во таков случај, за пресметување на „точната вредност“ на отпорноста на распростирање, треба да се користат моделите кои што се изведени во поглавјето 8 и кои што се применуваат кај каблите со неизолиран метален плашт. Значи електродата веќе не претставува концентриран заземјувач, туку заземјувач со распределени параметри, со надолжна импеданција $\underline{z} = r + jx$ и активна одводност по единица должина g коишто се пресметуваат со помош на следните формули

$$r = r_z + \frac{\rho}{S} = 0,05 + \frac{\rho}{S} \frac{\Omega}{\text{km}}, \quad \rho_{Cu} = 18 \frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{km}}, \quad \rho_{Fe} = 150 \frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{km}},$$

$$x = 0,1445 \cdot \log \frac{2D_e}{d} + 0,0157 \cdot \mu_r \frac{\Omega}{\text{km}}, \quad D_e = 658 \cdot \sqrt{\frac{\rho_z}{50}} \text{ m},$$

$$g = \frac{1000}{R_Z \cdot l} \frac{\text{S}}{\text{km}}.$$

Значи, кога сакаме моделирањето на долгиот линеичен заземјувач да го извршиме коректно, него треба да го претставиме со една π -заменска шема како на сликата П.10.12.1.



Слика П.10.12.1. Моделирање на долг заземјувач со π -образна заменска шема

Параметрите \underline{Z}_P и \underline{Y}_P на заменската шема од сликата П.10.12.1, врз основа на релациите (8.8) и (8.9), се пресметуваат со помош на следните релации

$$\underline{Z}_C = \sqrt{\frac{\underline{z}}{\underline{y}}} = \sqrt{\frac{r + jx}{g + j0}}, \quad \underline{\gamma} = \sqrt{\underline{z} \cdot \underline{y}} = \sqrt{(r + jx) \cdot g},$$

$$\underline{Z}_P = \underline{Z}_C \cdot \text{sh}(\underline{\gamma} \cdot l), \quad \underline{Y}_P = \frac{\text{ch}(\underline{\gamma} \cdot l) - 1}{\underline{Z}_C \cdot \text{sh}(\underline{\gamma} \cdot l)}, \quad (\text{П.10.12.2})$$

додека влезната импеданција Z_{vl} се пресметува со релацијата (8.11) која што за случајот на отворен крај на четворополот ($Z_2 = \infty$) гласи

$$Z_{vl} = Z_c \cdot \frac{\text{ch}(\gamma \cdot l)}{\text{sh}(\gamma \cdot l)}.$$

Пресметките ќе ги направиме со помош на компјутерска програма напишана во Matlab која што го има следниот изглед

programi/primeri/primer_12.m

```
1 rhoz = 100; h = 0.7; l = 200; d = 7.5e-03; S = 35; rho_Cu = 18;
2 De = 658 * sqrt(rhoz / 50);
3 Rz = rhoz / (pi*l) * log( l / sqrt(h*d) )
4 r = 0.05 + rho_Cu / S;
5 x = 0.1445*log10( 2*De/d ) + 0.0157;
6 z = r + 1j*x;
7 y = 1000 * pi / rhoz / log( l / sqrt(h * d) );
8 gama = sqrt(z * y);
9 Zc = sqrt(z / y);
10 gl = gama * (l/1000);
11 ZP = Zc * sinh(gl)
12 YP = (cosh(gl) - 1) / ZP
13 Zvl = Zc * cosh(gl) / sinh(gl)
14 ku = abs(Rz / Zvl)
```

со која го добиваме следниот резултат

```
>> primer_12
Rz =
    1.2610
ZP =
    0.1112 + 0.1638i
YP =
    0.3935 - 0.0041i
Zvl =
    1.2988 + 0.0524i
ku =
    0.9701
```

Значи отпорноста на распростирање на заземјувачот изнесува $R_Z = 1,261 \Omega$ додека неговата импеданција на заземјување е $Z_{vl} = (1,2981 + j0,0524) \Omega = 1,2991 \cdot e^{j2,31^\circ} \Omega$. И конечно, односот $k_u = R_z / |Z_{vl}|$, кој што е мерило за големината на грешката во моделирањето, изнесува $R_z / |Z_{vl}| = 1,261 / 1,2991 = 0,9701 \approx 0,97$. Тоа значи дека грешката во вредноста на пресметаната струја на одведување од овој заземјувач (за оваа должина), третиран како концентриран, ќе изнесува приближно $\varepsilon = (1 - 0,97) \cdot 100 = 3\%$.

Анализите покажуваат дека кај поголемите должини и грешката е поголема - и обратно. Така, на пример, за должина $l = 263 \text{ m}$ грешката ќе изнесува $\varepsilon = 5\%$. Тоа значи дека ако во пресметките усвоиме толеранција за грешката од најмногу 5%, тогаш за должини поголеми од $l_{gr.5\%} = 263 \text{ m}$ јажето не ќе смееме да го третираме како концентриран заземјувач чија отпорност на распростирање R_Z е

пресметана со (П.10.12.1) туку во пресметките ќе мора да се користи π -заменската шема од сликата П.10.12.1 чиишто параметри \underline{Z}_P и \underline{Y}_P ќе се пресметуваат со (П.10.12.2).



Пример 10.13. За бакарното јаже од примерот 10.12 да се утврди зависноста $l_{gr.5\%} = f(\rho_z)$ при што како критериум ќе се усвои големина на грешката (толеранција) $\varepsilon = 5\%$.

Истите анализи да се направат и за случајот кога наместо со бакарното јаже, заземјувачот е изведен со поцинкувана челична лента тип FeZn 30 × 4 за која се познати следните параметри: $S_{Fe} = 30 \times 40 = 120 \text{ mm}^2$, $d_{Fe} \simeq 2 \cdot (30 + 4)/\pi = 21,65 \text{ mm}$, $\rho_{Fe} = 150 \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{km}$ и магнетска пермиабилност на заситеното железо $\mu_r = 30$.

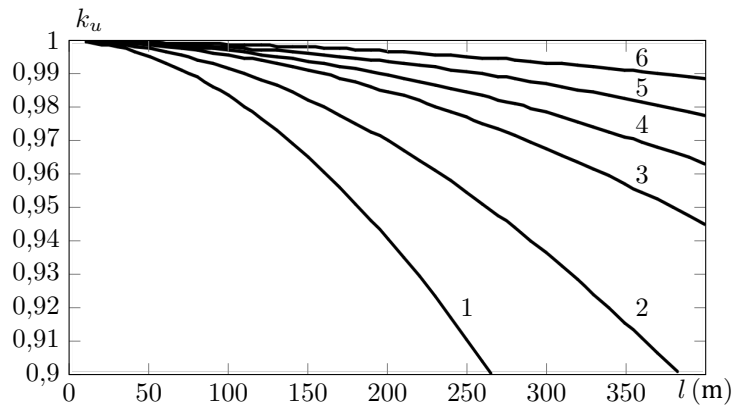
Решение

Со повеќекратна примена на постапката за пресметување на параметрите R_Z и \underline{Z}_{vl} на долг заземјувач во форма на јаже или лента, за разни должини l , се добива зависноста $R_Z = f(l)$. Вакви пресметки се направени за разни вредности на специфичната отпорност на тлото ρ_z и тоа: 1) $\rho_{z1} = 50 \Omega\text{m}$; 2) $\rho_{z2} = 100 \Omega\text{m}$; 3) $\rho_{z3} = 200 \Omega\text{m}$; 4) $\rho_{z4} = 300 \Omega\text{m}$; 5) $\rho_{z5} = 500 \Omega\text{m}$ и 6) $\rho_{z6} = 1000 \Omega\text{m}$. Врз основа на таквите пресметки, направени за случајот со бакарно јаже $S_{Cu} = 35 \text{ mm}^2$, се добиени резултатите прикажани во табелата П.10.13.1 и дијаграмот од сликата П.10.13.1.

Кривите од сликата П.10.13.1 се нумерирани во согласност со наведениот редослед на анализираните случаи, така што најдолната крива, означена со бројот 1, се однесува на случајот $\rho_z = 50 \Omega\text{m}$, кривата број 2 на случајот $\rho_z = 100 \Omega\text{m}$ и.т.н.

Од таквите анализи произлегува дека граничните должини $l_{gr.5\%}$ до кои што јажето може, со грешка $\varepsilon = 5\%$, да се третира како концентриран заземјувач со отпорност на распростирање R_Z , пресметана со познатата аналитичка формула, зависат во најголема мера од специфичната отпорност на тлото ρ_z а многу помалку од неговиот пресек. Во случајов, кога бакарното јаже има пресек 35 mm^2 , резултатите од пресметките се прикажани во табелата П.10.13.1.

Слични резултати се добиваат и за случајот кога како заземјувач е употребена челино-поцинкувана челична лента од типот FeZn30 × 4mm × mm. Резултатите од пресметките за овој случај се прикажани во табелата П.10.13.2. Се забележува дека граничните должини во овој случај се помали за околу 40%. Тоа се должи на поголемата надолжна импеданција на челичната лента.



Слика П.10.13.1. Графички приказ на зависноста на коефициентот $k_u = f(l)$ за јаже $\text{Cu } 35 \text{ mm}^2$

Табела П.10.13.1. Гранична должина на бакарно јаже $\text{Cu } 35 \text{ mm}^2$ во зависност од специфичната отпорност на плото

случај	1	2	3	4	5	6
$\rho_z (\Omega\text{m})$	50	100	200	300	500	1000
$l_{gr.5\%} (\text{m})$	182	263	379	470	616	887

Табела П.10.13.2. Гранична должина на челична лента $\text{FeZn } 30 \times 4$ во зависност од специфичната отпорност на плото

случај	1	2	3	4	5	6
$\rho_z (\Omega\text{m})$	50	100	200	300	500	1000
$l_{gr.5\%} (\text{m})$	114	165	240	298	391	566

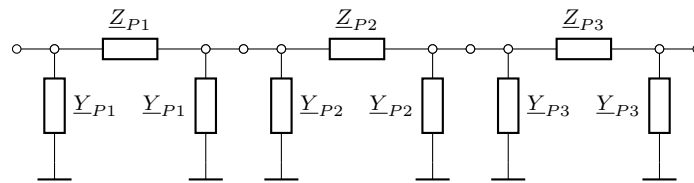
□ □ □

Пример 10.14. Бакарното јаже со пресек 35 mm^2 ($d = 7,5 \text{ mm}$, $S = 35 \text{ mm}^2$, види пример 10.12 е поставено во кабелски ров со вкупна должина $l = 1000 \text{ m}$, закопано на длабочина $h = 0,7 \text{ m}$. Земјиштето по должината на кабелската траса го менува својот состав, а со тоа и својата специфична отпорност. Во првиот дел од трасата, долг $l_1 = 200 \text{ m}$ специфичната отпорност на плото изнесува $\rho_{z1} = 50 \Omega\text{m}$. Во следниот дел од трасата, долг $l_2 = 700 \text{ m}$, специфичната отпорност изнесува $\rho_{z2} = 300 \Omega\text{m}$ и во последните $l_3 = 100 \text{ m}$ таа е $\rho_{z3} = 100 \Omega\text{m}$.

Да се пресметаат параметрите $\underline{Y}_{P1,e}$, $\underline{Z}_{P,e}$, $\underline{Y}_{P2,e}$ на π -еквивалентната заменска шема со која што може да се еквивалентира целиот заземјувачки систем формиран од бакарното јаже. Потоа, врз основа на неа да се пресмета влезната импеданција, т.е. импеданцијата на заземјување $\underline{Z}_{vl,e}$ на јажето.

Решение

Во овој случај задачата ќе ја решиме на тој начин што јажето, третирано како заземјувач, ќе го поделиме на три дела и тоа за секоја делница од трасата по еден и потоа, за секое такво парче од јажето парче ќе формираме по една π еквивалентна заменска шема, на начин како што е тоа направено во примерот 10.12. Со тоа заземјувачкиот систем на бакарното јаже, третирано како долг заземјувач, ќе се прикаже како каскадна врска на три π -образни симетрични четворополи, како на следната слика.



Слика П.10.14.1. Заземјувачкиот систем на бакарното јаже прикажан како каскада од три четворополи

Параметрите \underline{Z}_P и \underline{Y}_P на секој од овие четворополи, пресметани со помош на компјутерската програма изложена во примерот 10.12, како и нивните соодветни \underline{A} , \underline{B} , \underline{C} , \underline{D} параметри, пресметани со помош на релациите (7.35), се прикажани во табелата П.10.14.1.

Табела П.10.14.1. Параметри на еквивалентните четворополи за секоја делница од јажето

Делница	$\underline{Z}_P (\Omega)$	$\underline{Y}_P (S)$			
1	$0,1098 + j0,1640$	$0,7810 - j0,0156$			
2	$0,36904 + j0,6423$	$0,3886 - j0,0145$			
3	$0,0562 + j0,0802$	$0,2168 - j0,0006$			
Делница	\underline{A}	$\underline{B} (\Omega)$	$\underline{C} (S)$	\underline{D}	
1	$1,0883 + j0,1264$	$0,1098 + j0,1640$	$1,6330 + j0,0660$	$1,0883 + j0,1264$	
2	$1,1527 + j0,2442$	$0,3690 + j0,6423$	$0,8401 + j0,0637$	$1,1527 + j0,2442$	
3	$1,0122 + j0,0173$	$0,0562 + j0,082$	$0,4363 + j0,0025$	$1,0122 + j0,0173$	

Понатаму, со примена на теоријата на четворополи, каскадата од трите четворополи сега можеме да ја еквивалентираме со еден еквивалентен, кој што повторно ќе има π -образен облик. За таа цел најнапред се пресметуваат \underline{A} , \underline{B} , \underline{C} , \underline{D} параметрите на еквивалентниот четворопол.

$$\begin{bmatrix} \underline{A} & \underline{B} \\ \underline{C} & \underline{D} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{A}_1 & \underline{B}_1 \\ \underline{C}_1 & \underline{D}_1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \underline{A}_2 & \underline{B}_2 \\ \underline{C}_2 & \underline{D}_2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \underline{A}_3 & \underline{B}_3 \\ \underline{C}_3 & \underline{D}_3 \end{bmatrix},$$

$$\begin{bmatrix} \underline{A} & \underline{B} \\ \underline{C} & \underline{D} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1,4868 + j1,0061 & 0,4240 + j1,1162 \\ 3,5697 + j1,3587 & 1,8836 + j1,7926 \end{bmatrix}.$$

При познатите \underline{A} , \underline{B} , \underline{C} , \underline{D} параметри на еквивалентниот четворопол, со помош на релациите (7.36) ќе ги пресметаме параметрите $\underline{Y}_{P1.e}$, $\underline{Z}_{P.e}$, $\underline{Y}_{P2.e}$ на соодветниот π -четворопол.

$$\begin{aligned} \underline{Z}_{P.e} &= \underline{B} = (0,4240 + j1,1162) \Omega, \\ \underline{Y}_{P1.e} &= (\underline{D} - 1)/\underline{B} = (1,6663 - j0,1586) S, \\ \underline{Y}_{P2.e} &= (\underline{A} - 1)/\underline{B} = (0,9325 - j0,0819) S. \end{aligned}$$

Влезната импеданција на целиот заземјувачки систем прикажан со еквивалентниот π -образен четворопол се добива како однос на параметрите \underline{A} и \underline{C}

$$\underline{Z}_{vl.e} = \frac{\underline{A}}{\underline{C}} = \frac{1,4868 + j1,0061}{3,5697 + j1,3587} = 0,4575 + j0,1077 = 0,47 \cdot e^{j13,2^\circ} \Omega.$$

Доколку целиот заземјувач го посматравме упростоено, како паралелна врска од одделните отпорности на распростирање на секоја од трите делници $R_{Z1} = 0,6305 \Omega$, $R_{Z2} = 1,2518 \Omega$ и $R_{Z3} = 2,3024 \Omega$, ќе се добиеше следниот резултат

$$R_{Z.e} = R_{Z1} \Pi R_{Z2} \Pi R_{Z3} = 0,3547 \Omega.$$

Очигледно е дека во случајов упростиениот начин на пресметување на долгиот заземјувач дава резултат со премногу голема грешка и како таков е за такви должини неприменлив.

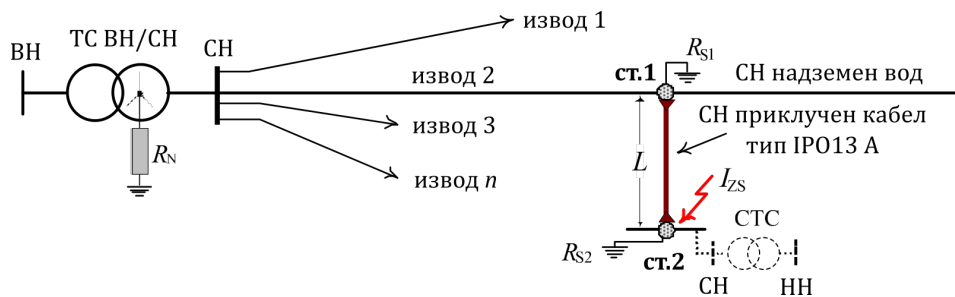
□ □ □

Пример 10.15. На сликата П.10.15.1 е прикажана столбна ТС СН/НН којашто е приклучена на СН надземна мрежа преку кус кабел, тип IPO13 А, 3×150 6/10 kV, со должина $l = 50$ m. Позната е специфичната отпорност на тлото во околината на самата трансформаторска станица

$\rho_z = 300 \Omega\text{m}$. Мрежата работи со изолирана неутрална точка со позната струја доземен спој $I_{ZS} = 25 \text{ A}$ иако во блиска иднина таа ќе премине да работи со неутрална точка заземјена преку мал активен отпор $R_N = 20 \Omega$ така што струјата на доземен спој ќе порасне на приближно 300 A .

Се посматра режим на работа на мрежата со земјоспој (спој на една од фазите со земја) настанат на самата столбна ТС СН/НН (столб бр. 2 на сликата). Познати се карактеристиките на заземјувачите R_{S1} и R_{S2} на обата столба помеѓу кои се наоѓа приклучниот СН кабел

1. заземјувач при столбот ст.1: едноконтурен, тип К1 со карактеристики: отпорност на распростирање $\Re_{Z1} = 17,5 \Omega$, $R_{S1} = \rho_z/100 \cdot \Re_{Z1} = 52,5 \Omega$, потенцијална разлика на допир и чекор, $\Delta E_d = 33\%$, $\Delta E_c = 37\%$.
2. заземјувач при столбот ст.2: двоконтурен, тип К2 со карактеристики: отпорност на распростирање $\Re_{Z2} = 11 \Omega$, $R_{S2} = \rho_z/100 \cdot \Re_{Z2} = 33 \Omega$, потенцијална разлика на допир и чекор $\Delta E_d = 14\%$, $\Delta E_c = 20\%$.



Слика П.10.15.1. Столбна ТС напојувана од надземна СН мрежа преку кус кабел

Да се пресметаат потенцијалите на столбовите U_1 и U_2 како и напоните на допир и чекор ($\Delta U_{d1}, \Delta U_{c1}$) и ($\Delta U_{d2}, \Delta U_{c2}$) при обата столба за време на земјоспојот. Дали во таквиот режим се исполнети критериумите за безбедност од превисоки напони на допир и чекор при столбовите ако нивните дозволени вредности изнесуваат $\Delta U_{d.doz} = \Delta U_{c.doz} = 65 \text{ V}$ (траен земјоспој). Пресметките да се повторат и за случајот кога струјата на земјоспој ќе порасне на вредноста $I_{ZS} = 300 \text{ A}$. Дали и тогаш ќе бидат задоволени условите за безбедност ако струјата на земјоспој се исклучува за време $t_{iskl} = 0,5 \text{ s}$ за кое што $\Delta U_{d.doz} = \Delta U_{c.doz} = 80 \text{ V}$.

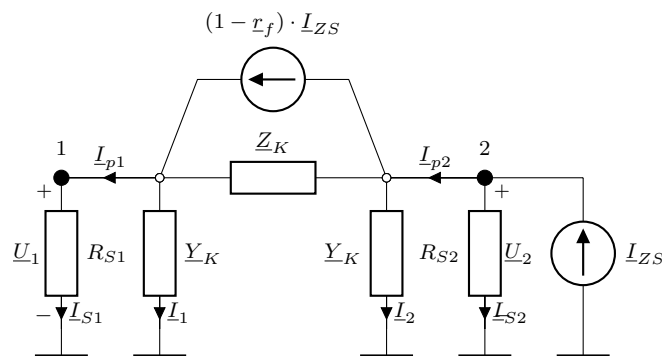
За кабелот којшто ги поврзува столбовите ст.1 и ст.2 се познати следните податоци: надворешен пречник на металниот плашт $D = 4,5 \text{ cm}$, должина $l = 50 \text{ m}$, редукионен фактор $r_f = 0,45 \cdot e^{j23^\circ}$, надолжна

импеданција на кабелскиот плашт заедно со челичната арматура $\underline{z} = (0,7 + j2,0) \Omega/\text{km}$ (незаситена состојба).

Решение

Во режимот со земјоспој, потенцијалите на столбовите \underline{U}_1 и \underline{U}_2 ќе добијат некои вредности, а струјата на земјоспој \underline{I}_{ZS} што се инјектира во заземјувачкиот систем при столбот ст.2 ќе се одведува во земјата преку заземјувачите R_{S1} и R_{S2} на овие столбови но и преку неизолираниот метален плашт на кабелот.

Во согласност со моделирањето на каблите со неизолиран метален плашт и правилата за формирање на колото на заземјувачкиот систем, пресметката на напоните \underline{U}_1 и \underline{U}_2 и струите на одведување во земја \underline{I}_{S1} и \underline{I}_{S2} за време на земјоспојот се сведува на решавање на еквивалентното коло за заземјувачкиот систем прикажано на сликата П.10.15.2.



Слика П.10.15.2. Еквивалентно коло на заземјувачкиот систем за пресметка на напоните и струите

Во шемата од сликата П.10.15.2 со \underline{Z}_K и \underline{Y}_K се означени параметрите на соодветната π -заменска шема на заземјувачкиот систем на кабелот преку којшто е поврзана столбната трансформаторска станица на напојниот СН надземен извод. Нивните вредности зависат, во основа, од карактеристиките на самиот кабел но зависат и од специфичната отпорност на земјиштето во коешто е тој поставен, а се пресметуваат на познатиот начин (види пример 10.12). Со r_f на сликата е означен редукиониот фактор на кабелот.

За пресметаните вредности на параметрите на π -заменската шема на кабелот се добиваат следните резултати

$$\underline{Z}_K = (0,0349 + j0,1001) \Omega;$$

$$\underline{Y}_K = (0,0464 - j0) \text{ S}.$$

Понатаму, следува постапка за решавање на состојбата во колото од сликата П.10.15.2. Најнапред ќе ја формираме матрицата \underline{Y} , а потоа нејзината инверзна матрица $\underline{Z} = \underline{Y}^{-1}$,

$$\underline{Y} = \begin{bmatrix} R_{S1}^{-1} + \underline{Y}_K + \underline{Z}_K^{-1} & -\underline{Z}_K^{-1} \\ -\underline{Z}_K^{-1} & R_{S2}^{-1} + \underline{Y}_K + \underline{Z}_K^{-1} \end{bmatrix} =$$

$$= \begin{bmatrix} 3,2679 - j8,9089 & -3,0717 + j8,9085 \\ -3,0717 + j8,9085 & 3,3017 - j8,9089 \end{bmatrix} \text{ S,}$$

$$\underline{Z} = \underline{Y}^{-1} = \begin{bmatrix} 2,3562 + j0,0325 & 2,3370 - j0,0212 \\ 2,3370 - j0,0212 & 2,3534 + j0,0247 \end{bmatrix} \Omega.$$

Конечно ја формираме и десната страна од системот равенки $\underline{Y} \cdot \underline{U} = \underline{J}$. За вредностите $\underline{I}_{ZS} = 25 \cdot e^{j0^\circ}$ А и $r_f = 0,45 \cdot e^{j23^\circ}$, според сликата П.10.15.2, ќе биде

$$\underline{J} = \begin{bmatrix} (1 - r_f) \cdot \underline{I}_{ZS} & \underline{I}_{ZS} - (1 - r_f) \cdot \underline{I}_{ZS} \end{bmatrix}^T =$$

$$= \begin{bmatrix} 14,6442 - j4,3954 & 10,3558 + j4,3954 \end{bmatrix}^T \text{ A.}$$

Со решавање на системот равенки се добиваат бараните вредности на потенцијалите (напоните) U_1 и U_2 на заземјувачите од столбовите ст.1 и ст.2.

$$\underline{U} = \underline{Z} \cdot \underline{J} = \begin{bmatrix} 176,17 + j0,17 \\ 175,62 + j0,02 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 176,17 \cdot e^{j0,06^\circ} \\ 175,62 \cdot e^{j0,01^\circ} \end{bmatrix} \text{ V.}$$

И конечно, за напоните на допир и чекор кај столбовите ст.1 и ст.2. ќе имаме

$$U_{1d} = \frac{\Delta E_d}{100} \cdot \frac{U_1}{s_d} = 40,09 \text{ V}; \quad U_{1c} = \frac{\Delta E_c}{100} \cdot \frac{U_1}{s_c} = 23,28 \text{ V};$$

$$U_{2d} = \frac{\Delta E_d}{100} \cdot \frac{U_2}{s_d} = 17,01 \text{ V}; \quad U_{2c} = \frac{\Delta E_c}{100} \cdot \frac{U_2}{s_c} = 12,54 \text{ V};$$

каде што се $s_d = 1 + 1,5 \cdot \rho_z / 1000 = 1,45$ и $s_c = 1 + 6 \cdot \rho_z / 1000 = 2,8$.

Очигледно е дека вредностите на напоните на допир и чекор се под дозволените 65 V што значи дека опасности за луѓето и другите живи суштества при земјоспој кај столбната трафостаница ќе нема. Всушност опасност нема да има и за поголема струја на земјоспојот. Пресметките покажуваат дека напонот на допир при столбот ст.1 (критичен во случајов) ќе ги достигне дозволените 65 V дури при струја на земјоспој $I_{ZS} = 45,5$ А која што е за 62% поголема од постојната. Но јасно е

дека во случајот кога струјата на земјоспој во блиска иднина порасне на вредноста $I'_{ZS} = 300 \text{ A} = 12 \cdot I_{ZS}$, сите напони ќе пораснат линеарно за 12 пати и тогаш условите за безбедност ни од далеку нема да бидат задоволени.

За струите на одведување во земја I_{S1} и I_{S2} како и за струите на почетокот и крајот од плаштот на кабелот I_{p1} и I_{p2} , ги добиваме следните резултати

$$\begin{aligned} I_{S1} &= U_1/R_{S1} = 3,356 \cdot e^{j0^\circ} \text{ A}; & I_{S2} &= U_2/R_{S2} = 5,322 \cdot e^{j0^\circ} \text{ A}; \\ I_{p1} &= I_{S1}; & I_{p2} &= I_{ZS} - I_{S2} = 19,678 \text{ A}; & I_{p2} - I_{p1} &= 16,323 \text{ A}. \end{aligned}$$

Заклучуваме дека заземјувачите на столбовите одведуваат во земја вкупно 8,68 А, односно 34,7% од струја на грешка I_{ZS} , додека преостанатите 16,32 А или 65,3% се одведуваат во земјата преку плаштот на кабелот.

Потенцијалите на двата столба можеме да ги пресметаме и со програмата `resi_zs`. За таа цел прво формираме влезна датотека со следниот изглед

programi/sistem/zs_3.m

```
1 function zs = zs_3()
2 zs.Zv = inf;
3 rf = 0.45 * exp(1j*23/180*pi);
4 Izs = 25;
5 Je = (1 - rf)*Izs;
6 zs.J = [Je Izs-Je].';
7 zs.Rz = [52.5 33]';
8 zs.granki = [
9   1 2 0.0349 + 0.1001i 0.0464
10  ];
```

а потоа решението го добиваме на следниот начин

```
>> [U,Iz,If,It] = resi_zs('zs_3');
>> U = abs(U)
U =
 176.1662
 175.6169
```



11

ПРИЛОГ: ГАУСОВА РАСПРЕДЕЛБА

$$F(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot \int_{-\infty}^x e^{-\frac{t^2}{2}} \cdot dt, \quad F(-x) = 1 - F(x)$$

Табела 11.1. Гаусова функција на распределба

x	$F(x)$	x	$F(x)$	x	$F(x)$	x	$F(x)$
-4,0	0,00003	-2,0	0,02275	0,0	0,50000	2,0	0,97725
-3,9	0,00005	-1,9	0,02872	0,1	0,53983	2,1	0,98214
-3,8	0,00007	-1,8	0,03593	0,2	0,57926	2,2	0,98610
-3,7	0,00011	-1,7	0,04457	0,3	0,61791	2,3	0,98928
-3,6	0,00016	-1,6	0,05480	0,4	0,65542	2,4	0,99180
-3,5	0,00023	-1,5	0,06681	0,5	0,69146	2,5	0,99379
-3,4	0,00034	-1,4	0,08076	0,6	0,72575	2,6	0,99534
-3,3	0,00048	-1,3	0,09680	0,7	0,75804	2,7	0,99653
-3,2	0,00069	-1,2	0,11507	0,8	0,78814	2,8	0,99744
-3,1	0,00097	-1,1	0,13567	0,9	0,81594	2,9	0,99813
-3,0	0,00135	-1,0	0,15866	1,0	0,84134	3,0	0,99865
-2,9	0,00187	-0,9	0,18406	1,1	0,86433	3,1	0,99903
-2,8	0,00256	-0,8	0,21186	1,2	0,88493	3,2	0,99931
-2,7	0,00347	-0,7	0,24196	1,3	0,90320	3,3	0,99952
-2,6	0,00466	-0,6	0,27425	1,4	0,91924	3,4	0,99966
-2,5	0,00621	-0,5	0,30854	1,5	0,93319	3,5	0,99977
-2,4	0,00820	-0,4	0,34458	1,6	0,94520	3,6	0,99984
-2,3	0,01072	-0,3	0,38209	1,7	0,95543	3,7	0,99989
-2,2	0,01390	-0,2	0,42074	1,8	0,96407	3,8	0,99993
-2,1	0,01786	-0,1	0,46017	1,9	0,97128	3,9	0,99995

Табела 11.2. Инверзна гаусова функција на распределба $P = F^{-1}(x)$

P	x	P	x	P	x	P	x
0,50	0,00000	0,70	0,52440	0,90	1,28155	0,9990	3,090232
0,51	0,02507	0,71	0,55338	0,91	1,34076	0,9991	3,121389
0,52	0,05015	0,72	0,58284	0,92	1,40507	0,9992	3,155907
0,53	0,07527	0,73	0,61281	0,93	1,47579	0,9993	3,194651
0,54	0,10043	0,74	0,64335	0,94	1,55477	0,9994	3,23888
0,55	0,12566	0,75	0,67449	0,95	1,64485	0,9995	3,290527
0,56	0,15097	0,76	0,70630	0,96	1,75069	0,9996	3,352795
0,57	0,17637	0,77	0,73885	0,97	1,88079	0,9997	3,431614
0,58	0,20189	0,78	0,77219	0,98	2,05375	0,9998	3,540084
0,59	0,22754	0,79	0,80642	0,99	2,32635	0,9999	3,719016
0,60	0,25335	0,80	0,84162	0,991	2,36562		
0,61	0,27932	0,81	0,87790	0,992	2,40892		
0,62	0,30548	0,82	0,91537	0,993	2,45726		

12

Прилог: Основни поими за MATLAB

MATLAB е кратенка од „MATrix LABoratory“ (лабораторија за матрици) и тој претставува интерпретерски програмски јазик наменет за нумеричка анализа на широк спектар проблеми. Неговата развојна околина содржи голем број функции за решавање на линеарни и нелинеарни системи равенки, диференцирање и интегрирање, системи диференцијални равенки, оптимизација на функции со повеќе променливи, статистика, интерполација итн. Освен тоа, тој има интерфејси кон други програмски јазици и функционира на голем дел од современите оперативни системи вклучувајќи Windows, Mac OS и Linux. Поради тоа MATLAB има примена во сите области на инженерството, природните науки, економијата и на други места.

MATLAB е слабо типизиран (weakly typed) програмски јазик што значи дека во него нема строга дефиниција на типовите на податоци. Тоа значи дека програмите можеме да ги пишуваме без посебни декларации на променливите при што не треба да дефинираме ниту тип на променлива ниту нејзини димензии. Тоа овозможува брзо пишување на програми со кои сакаме да провериме некоја идеја и да дојдеме до брзи резултати и заклучоци. Читателите кои програмирале во некој друг програмски јазик (C, C++, FORTRAN) веднаш ќе ја воочат оваа предност на MATLAB. Иако MATLAB е поспор во споредба со наведените програмски јазици, кога сакаме да решиме некој проблем не треба да го споредуваме само времето потребно за извршување на пресметките туку и времето потребно да се напише програмата. Пишувањето и тестирањето на програми во MATLAB е далеку поедноставно од C, C++ или FORTRAN.

За проблемите кои се изучуваат во учебникот потребни се софтверски алатки за решавање определени интегрални, системи линеарни равенки, операции со комплексни броеви и цртање на криви и површини во простор. За сите наведени операции постојат функции

во MATLAB кои се едноставни за користење така што неговата примена сама по себе се наметнува. Изборот на MATLAB е направен и поради следните две причини

- MATLAB е применуван и во други курсеви на студиите по електротехника и студентите се веќе делумно запознаени со него,
- Програмирањето во MATLAB е практично идентично со програмирањето во GNU Octave, кој е бесплатен и со тоа достапен на секого.

Во програмирањето е многу важно да се усвои критички однос кон резултатите кои се добиени со некоја компјутерска програма. Во секоја програма е можно да има некоја грешка, а уште повеќе е можно да има грешка во влезните податоци кои се потребни за неа. И најдобрата компјутерска програма со погрешни влезни податоци ќе даде погрешно решение. Откривањето на „дефекти“ во добиеното решение е вештина која може да се стекне со долготрајно проучување на проблемите и нивно решавање.

12.1 Операции со матрици

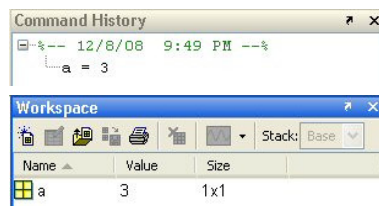
Доколку во командниот прозорец ја напишеме наредбата $a = 3$ и притиснеме Enter ќе го добиеме следниот резултат

```
>> a = 3  
a =  
    3
```

На таков начин на променливата сме и доделиле вредност 3, при што тоа ни е прикажано во командниот прозорец со изразот

```
a =  
    3
```

а истовремено е променета содржината на Command History и на Workspace така што тие сега изгледаат како на сликата 12.1.



Слика 12.1. Изглед на Command History и на Workspace по извршување на една команда

На сликата 12.1 гледаме дека командата $a = 3$ е запишана во историјата со команди, а во работниот простор е меморирана променливата за која што таму е наведено дека има димензии 1×1 .

Тоа е така затоа што во MATLAB сите променливи се третираат како матрици. Во овој случај, бидејќи внесовме само еден број, програмот сфатил дека сме сакале да внесеме матрица со една редица и една колона.

Доколку истата команда ја напишеме со знакот „;“ на крајот, т.е. доколку напишеме $a = 3$; ќе ги добиеме наплно истите промени само што во командниот прозорец ништо немаше да ни се испише.

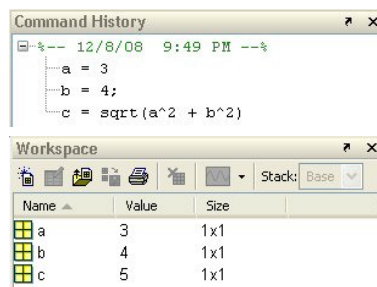
Ако понатаму напишеме две други команди на следниот начин

```
>> b = 4;  
>> c = sqrt(a^2 + b^2)
```

ќе го добиеме следниот одговор

```
c =  
    5
```

Воедно ќе дојде до промене на содржината на Command History и на Workspace така што тие сега ќе изгледаат како на сликата 12.2.



Слика 12.2. Изглед на Command History и на Workspace по извршување на повеќе команди

Со наредбата

```
p = [2 -4 7]
```

го добиваме следниот резултат

```
p =  
    2 -4 7
```

со што всушност сме дефинирале променлива p која што е матрица со една редица и три колони.

Доколку сакаме да дефинираме матрица колона q тогаш можеме да напишеме

```
>> q = [  
    -1  
     2  
     9]
```

а до истиот резултат можеме да дојдеме и ако ја напишеме следната наредба

```
>> q = [-1; 2; 9]
```

што значи дека знакот „;“ при внесувањето на матрици означува дека после него треба да започне нова редица.

Дводимензионална матрица A можеме да внесеме на еден од следните два начина

```
>> A = [  
1 3 6  
8 9 2  
0 3 1]
```

или

```
>> A = [1 3 6; 8 9 2; 0 3 1]
```

со што го добиваме следниот, идентичен, резултат

```
A =  
1 3 6  
8 9 2  
0 3 1
```

Множењето на две матрици во MATLAB се изведува на многу едноставен начин, исто како да множиме две обични променливи. На пример, можеме да напишеме

```
>> B = A * q  
B =  
59  
28  
15
```

со што го добиваме векторот B којшто е производ на матрицата A и векторот q .

При множењето на матрици треба да водиме сметка нивните димензии да се такви што ќе овозможат да се изврши нивното множење. На пример, можеме да пресметаме

```
>> p * q  
ans =  
53
```

или пак

```
>> q * p  
ans =  
-2 4 -7  
4 -8 14  
18 -36 63
```

но следната операција генерира грешка

```
>> q * A  
Error using *  
Inner matrix dimensions must agree.
```

затоа што бројот на колони на матрицата q не е еднаков со бројот редици на матрицата A .

Следната операција

```
>> q' * A  
ans =  
15 42 7
```

повторно е изводлива затоа што со наредбата q' правиме транспонирање на матрицата q со што се добива

```
>> q'  
ans =  
-1    2    9
```

При транспонирање на матрици треба да имаме предвид дека ако се работи за матрица со комплексни броеви¹ таа едновременно ќе биде и коњугирана.

```
>> z = [2 + 1j*3; 3 - 1j*2; -2 + 1j*9]  
z =  
2.0000 + 3.0000i  
3.0000 - 2.0000i  
-2.0000 + 9.0000i  
>> z'  
ans =  
2.0000 - 3.0000i    3.0000 + 2.0000i    -2.0000 - 9.0000i
```

Доколку при транспонирањето не сакаме матрицата да биде коњугирана треба да напишеме

```
>> z.'  
ans =  
2.0000 + 3.0000i    3.0000 - 2.0000i    -2.0000 + 9.0000i
```

каде што гледаме дека пред знакот за транспонирање имаме напишано точка.

Доколку сакаме да извршиме некоја операција врз секој од елементите на една матрица одделно, пред соодветниот оператор се става знакот точка, како на пример

```
>> q.^2  
ans =  
1  
4  
81
```

или

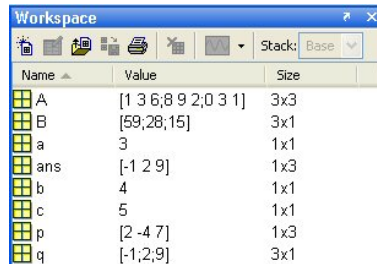
```
>> p' .* q  
ans =  
-2  
-8  
63
```

Во последниот случај сме извршиле множење на елемент по елемент од векторите p' и q .

Како што може да се забележи во претходните неколку примери доколку напишеме наредба во која што нема променлива од левата страна на наредбата, по која што следува знакот за еднаквост, а потоа и самата наредба, резултатот се запишува во променливата `ans`.

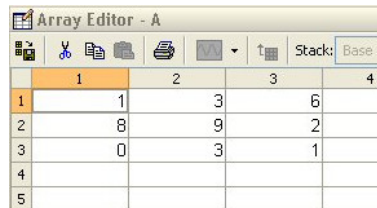
¹Имагинарната единица во MATLAB може да се напише на повеќе начини. Така на пример за да го добиеме бројот $j3$ можеме да напишеме $1j*3$, $1i*3$, $3j$ или $3i$.

По извршувањето на сите претходни наредби прозорецот со Command History е пополнет со сите нив, додека работниот простор го има изгледот прикажан на сликата 12.3.



Слика 12.3. Повеќе променливи во работниот простор

Доколку кликнеме два пати на која било променлива од работниот простор, тогаш ќе ни се отвори нов прозорец во кој што ќе ја видиме содржината на одбраната променлива. Така, на пример, ако ја одбереме променливата A го добиваме изгледот на MATLAB прикажан на сликата 1.5 каде што ја гледаме содржината на променливата A.



Слика 12.4. Содржина на една променлива во MATLAB

Пристапување до одделен елемент на матрица се прави на следниот начин

```
>> A(1,2)
ans =
     3
```

доколку, пак, сакаме да земеме 2 или повеќе елементи од една редица или колона можеме да напишеме

```
>> A(1:2,2)
ans =
     3
     9
```

со што сме ги добиле елементите A_{12} и A_{22} . Целата втора колона можеме да ја добиеме ако напишеме

```
>> A(:,2)
ans =
     3
     9
```

3

додека двоето на трите колони од матрицата во посебни променливи можеме да го направиме на следниот начин

```
>> a = A(:,1);  
>> b = A(:,2);  
>> c = A(:,3);
```

Последните 3 команди можеме да ги напишеме и со една команда како што следува

```
>> [a, b, c] = deal(A(:,1), A(:,2), A(:,3))
```

Доколку имаме вектори со еднаква должина од нив можеме да формираме нова матрица на следниот начин

```
>> C = [c b a b]
```

```
C =  
     6     3     1     3  
     2     9     8     9  
     1     3     0     3
```

На крајот од воведниот дел ќе илустрираме како со досегашното познавање на MATLAB и само уште една едноставна наредба ќе можеме да решиме релативно комплициран математички проблем.

Пример 12.1. Да се одредат сите нули на полиномот

$$P(x) = x^4 - 10x^3 + 35x^2 - 50x + 24.$$

Решение

Дефинираме матрица P со една редица во која што ќе ги сместиме коефициентите од полиномот. Тоа го правиме со следната наредба

```
P = [1 -10 35 -50 24];
```

а потоа ги одредуваме нулите на полиномот со помош на наредбата

```
>> x = roots(P)
```

```
x =  
 4.0000  
 3.0000  
 2.0000  
 1.0000
```

со што ја добиваме променливата x во која што е запишан резултатот. Од неа гледаме дека нулите на полиномот се 4, 3, 2 и 1.

□ □ □

12.2 Системи линеарни равенки

Познато е дека решението на еден систем линеарни равенки напишан во матричен облик на следниот начин

$$A \cdot x = b,$$

наједноставно може да се изрази со помош на инверзната матрица на системот како

$$x = A^{-1} \cdot b,$$

но таквиот начин на одредување на векторот со непознатите променливи x не е секогаш најефикасен.

Постојат случаи во коишто матрицата A содржи многу елементи со вредност нула при што таа се нарекува слабополната матрица (sparse matrix на англиски). Во таквите случаи далеку подобро е да се користат посебни методи за решавање, но и за меморирање на елементите на матрицата A .

Нека е даден следниот систем равенки во којшто матрицата A е слабополната

$$\begin{bmatrix} 3 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 4 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 7 & 5 & 9 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 8 & 2 \\ 0 & 0 & 0 & 6 & 5 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 3 \\ 4 \\ 5 \\ 22 \\ 27 \end{bmatrix},$$

којшто, според вообичаениот пристап на проблемот, во MATLAB можеме да го решиме на следниот начин

```
A = [3 0 1 0 0; 0 4 0 0 0; 0 7 5 9 0; 0 0 0 8 2; 0 0 0 6 5];
```

```
b = [3; 4; 25; 22; 27];
```

```
x = A^-1 * b
```

```
x =  
 1.0000  
 1.0000  
-0.0000  
 2.0000  
 3.0000
```

Во претходно опишаната постапка дефиниравме матрица A со 5 редици и 5 колони која што содржи 25 елементи. Но долголку во командниот простор ја напишеме наредбата

```
>> nenulti = nnz(A)
```

```
nenulti =  
 10
```

гледаме дека таа има само 10 ненулни елементи, што значи дека неа можеме да ја меморираме користејќи далеку помалку меморија.

Матрицата A можеме да ја претвориме во слабопополнета матрица во MATLAB со помош на командата

```
>> A = sparse(A)
A =
(1,1)      3
(2,2)      4
(3,2)      7
(1,3)      1
(3,3)      5
(3,4)      9
(4,4)      8
(5,4)      6
(4,5)      2
(5,5)      5
```

од каде што гледаме во новата матрица A се запомнети само ненултите елементи и локациите каде што тие се наоѓаат. Но секако дека ваквата постапка нема да ја користиме за да ја формираме матрицата A затоа што претходно треба да ја формираме како полна матрица, со сите 25 елементи, а токму тоа сакаме да го избегнеме.

Една од постапките за пополнување на ретка матрица е следната: формираме помошна матрицата B

```
B = [1  1  3
      2  2  4
      3  2  7
      1  3  1
      3  3  5
      3  4  9
      4  4  8
      5  4  6
      4  5  2
      5  5  5];
```

која што има 10 редици (колку што има ненулти елементи во A) и три колони. Во една редица од матрицата B се дадени податоци за еден ненулти елемент на матрицата A . При тоа во таа редица во првите две колони се дадени индексите на редицата и колоната од матрицата од матрицата A каде што се наоѓа ненултиот елемент, како и неговата вредност која што е дадена во третата колона.

Така на пример од матрицата B гледаме дека првиот третиот ненулти елемент во матрицата A се наоѓа на позицијата (3,2) во матрицата, а неговата вредност изнесува 7, т.е. $A_{32} = 7$.

Користејќи ја матрицата B можеме да ја добиеме матрицата A во форма на слабопополнета матрица со помош на наредбата

```
A = spconvert(B)
```

Слабопополнета матрица можеме да формираме и со помош на командата `sparse` на следниот начин

```
i = [1 2 3 1 3 3 4 5 4 5];
j = [1 2 2 3 3 4 4 4 5 5];
v = [3 4 7 1 5 9 8 6 2 5];
```

```
A = sparse(i, j, v, 5, 5);
```

од каде што се гледа дека таа користи 3 вектори кои всушност се колоните од матрицата B . Со последните две вредности се задава бројот на редици и колони, кој во случајов изнесува 5.

Конечно, можеме да постапиме и на трет начин. Прво формираме слабопоплнета матрицата со димензии 5×5 во која што сите елементи се нули

```
>> A = sparse(5,5)
A =
  All zero sparse: 5-by-5
```

со што сме создале променлива во MATLAB која ќе биде запомнета како слабопоплнета матрица и која што на почетокот нема ниту еден елемент. Потоа можеме да ги додаваме елементите во таа празна матрица пишувајќи ги следните наредби

```
A(1,1) = 3; A(2,2) = 4; A(3,2) = 7; A(1,3) = 1; A(3,3) = 5;
A(3,4) = 9; A(4,4) = 8; A(5,4) = 6; A(4,5) = 2; A(5,5) = 5;
```

со што сакаме да покажеме дека до елементите на една слабопополнета матрица во MATLAB можеме да пристапиме и да ги менуваме како и елементите на секоја друга обична (полна) матрица.

Откако сме ја формирале слабопополнетата матрица A системот равенки можеме да го решиме на следниот начин

```
>> x = A\b
x =
     1
     1
     0
     2
     3
```

каде што го користиме операторот „\“ којшто во MATLAB означува решавање на систем линеарни равенки каде што променливата пред него е матрицата A на системот равенки, а променливата по него е векторот од десната страна на системот b . Овој оператор води сметка за слабата пополнетост на матрицата и пресметките ги прави далеку побрзо отколку во случајот кога решението го добивавме преку инверзија на матрицата A .

Пример 12.2. Да се реши систем равенки со 1000 непознати, зададен на следниот начин

$$\begin{bmatrix} 2 & -1 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 3 & -1 & \cdots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 3 & \cdots & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 3 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & -1 & 3 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & -1 & 2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ \vdots \\ x_{998} \\ x_{999} \\ x_{1000} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 3000 \\ 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix},$$

каде што матрицата на системот A е слабопополнета. При тоа е познато дека матрицата A има ненулни елементи по главната дијагонала коишто имаат вредности еднаква на 3 освен првиот и последниот коишто имаат вредност еднаква на 2. Покрај тоа, ненулни елементи постојат и на двете соседни дијагонали на главната дијагонала и при тоа сите елементи изнесуваат -1 . Во векторот b од десната страна на системот равенки само првиот елемент не е нула и има вредност еднаква на 3000.² Проблемот да се реши на два начина

- а) Со матрична инверзија и користење на полни матрици,
- б) Со примена на операторот „\“ и користење на слабопополнети матрици.

Решение

Решението за првиот случај е дадено во датотеката ravenki1000a.m чија што содржина е следната

```

programi/matlab/ravenki1000a.m
1 n = 1000; A = zeros(n,n); b = zeros(n,1);
2 A(1,1) = 2; A(n,n) = 2;
3 for i = 2:n-1
4     A(i,i) = 3;
5 end
6 for k = 2:n
7     A(k,k-1) = -1;
8     A(k-1,k) = -1;
9 end
10 b(1) = 3000;
11 tic
12 x = A^-1 * b;
13 toc
    
```

Во првиот ред од програмата ги дефинираме матрицата A и векторот b како матрици со сите елементи еднакви на нули со помош на

²Ваков систем равенки се добива ако решаваме коло во форма на скала со 1000 јазли. Сите отпорници имаат отпорност од 1Ω , а во јазелот 1 е инјектирана струја од 3000 А.

наредбата `zeros`. Потоа ја пополнуваме матрицата A . Согласно со зададените вредности и обликот на матрицата, во редиците 2-5 ги пополнуваме дијагоналните елементи на матрицата, а во редиците 6-9 вондијагоналните, т.е. елементите на соседните дијагонали на главната дијагонала. Ненултиот елемент во векторот b го задаваме во редицата 10. Решавањето на системот равенки се прави во редицата 12, а пред неа и по неа се напишани командите `tic` и `toc` со коишто во MATLAB е овозможено мерење на времето за извршувањето на операциите кои се помеѓу нив.

Со активирање на програмата добиваме решение, кое не го прикажуваме заради големината на векторот x , а во командниот простор ја добиваме следната порака

```
>> ravenki1000a
Elapsed time is 0.148255 seconds.
```

што е всушност времето потребно за решавање на системот равенки користејќи матрична имверзија.

Во случајот под б) проблемот го решаваме со програмата `ravenki1000b.m` во која што сите операции ги правиме со примена на слабопополнети матрици.

programi/matlab/ravenki1000b.m

```
1 n = 1000;
2 A = sparse(1:n,1:n,3,n,n) ...
3   + sparse(2:n,1:n-1,-1,n,n) ...
4   + sparse(1:n-1,2:n,-1,n,n);
5 A(1,1) = 2; A(n,n) = 2;
6 b = sparse(1,1,3000,1000,1);
7 disp('Resavanje na sistemot ravenki 1000 pati');
8 tic
9 for i = 1:1000
10     x = A \ b;
11 end
12 toc
```

Матрицата A ја формираме со командите од редиците 2-5. Во наредбата `sparse(1:n,1:n,3,n,n)`, која ако ја споредиме со нејзината општа форма `sparse(i,j,v,n,n)`, гледаме дека векторите i и j со кои се дефинирани индексите на редиците и колоните на ненултите елементи ги содржат броевите $1, 2, \dots, n$ додека векторот v го содржи само бројот 3. Тоа значи сите ненулти елементи се еднакви на 3 и тие се наоѓаат на главната дијагонала од матрицата. На сличен начин, со `sparse(2:n,1:n-1,-1,n,n)` се задаваат вредностите -1 во дијагоналата под главната, а со `sparse(1:n-1,2:n,-1,n,n)` во дијагоналата над главната.

Векторот b се формира во редицата 6 со што добиваме

```
>> b = sparse(1,1,3000,1000,1)
b =
```

```
(1,1)          3000
```

што може да не наведе на помислата дека се работи за скалар со вредност 3000, но дека тоа не е така можеме да провериме на следниот начин

```
>> size(b)
ans =
    1000     1
```

од каде што гледаме дека се работи за вектор со должина 1000 и со само 1 ненулт елемент.

Решавањето на системот равенки го правиме во редиците 9-11 каде што гледаме дека пресметките ги правиме 1000 пати затоа што тие се толку брзи што ако ги извршиме само еднаш тешко ќе можеме да измериме колку време е потребно за таа операција.

Резултатот којшто го добиваме во овој случај е идентичен како претходно, а во командниот простор ја добиваме следната порака

```
>> ravenki1000b
Resavanje na sistemot ravenki 1000 pati
Elapsed time is 0.045611 seconds.
```

од каде што дека времето потребно за решавање на системот равенки користејќи ја операцијата „\“ е околу 32.000 пати помало³ од времето потребно за решавање на истиот систем равенки со примена на матрична инверзија. Освен тоа, во овој случај меморираме само 2998 елементи од матрицата A , наместо 1.000.000 колку што мемориравме во првиот случај.

Меморијата која се зафаќа со матрицата A можеме да ја видиме со командата `whos A` од каде добиваме дека ако користиме полна матрица ќе ни требаат 8.000.000 bytes, додека ако користиме слабопополнета матрица ќе ни требаат само 55.976 bytes.

□ □ □

12.3 Дефинирање на функции

Во MATLAB постојат два начина за дефинирање на функции од страна на корисникот и тоа со пишување во една командна линија или со дефинирање на функција во посебна `m`-датотека. Двата пристапа ќе ги илустрираме преку примери.

Пример 12.3. Дадена е функцијата $f(x)$ од една променлива

$$f(x) = xe^{-x} - 0, 2; \quad (\text{П.12.3.1})$$

за која што е потребно да извршат следните работи

³Времињата се мерени на лаптоп со процесор Intel Core i5-3210M CPU @ 2.50GHz, со 4 GB RAM, при што е користен MATLAB R2014a 64-bit и оперативен систем Ubuntu 16.04 64-bit.

- а) да се напише функција во MATLAB во една линија во која што ќе биде дефинирана функцијата, а потоа таа да се нацрта во интервалот $0 \leq x \leq 5$.
- б) да се повтори задачата под а) со тоа што функција ќе се напише во посебна m-датотека.

Решение

а) За дефинирање на функции во една линија во MATLAB се користи анонимна функција која што во овој случај го има следниот изглед

```
>> f = @(x) x .* exp(-x) - 0.2  
f =  
    @(x)x.*exp(-x)-0.2
```

каде што се гледа по наредбата `@(x)`, со која дефинираме дека функцијата е од променливата x се пишува изразот на функцијата како обичен текст. Во функцијата наместо обично множење имаме ставено точкасто множење `.*` со кое што операцијата множење помеѓу елементите x и $\exp(x)$ се прави за секој елемент од x посебно. За се увериме дека нашата нова функција работи можеме да напишеме

```
>> f(1)  
ans =  
    0.1679
```

што навистина одговара на вредноста на изразот $1 \cdot e^{-1} - 0,2$.

За да ја нацртаме функцијата прво ќе ја дефинираме променлива x како вектор кој што ги содржи броевите од 0 до 5 со чекор од 0,1. Тоа го правиме на следниот начин

```
x = 0:0.1:5;
```

а потоа ја пресметуваме вредноста на функцијата во сите точки од векторот x со помош на наредбата

```
y = f(x);
```

и на крајот функцијата ја цртаме со помош на наредбата

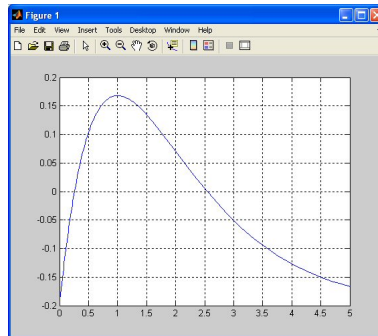
```
plot(x,y)grid
```

со што го добиваме резултатот прикажан на сликата П.12.3.1.

Наредбата `plot` се користи за цртање на функции при што како прв параметар се задава вектор кој што содржи координати од хоризонталната оска, а потоа вектор со координати од вертикалната оска. Со наредбата `grid` ги цртаме хоризонталните и вертикални исцрткани линии кои што се гледаат на сликата 4.1. До истиот резултат ќе дојдеме и доколку наместо `plot(x, y)` напишеме `plot(x, f(x))`. Во тој случај претходната команда `y = f(x);` е непотребна.

Покрај овој начин, графикот на функцијата можеме да го добиеме и со помош на следната команда

```
fplot(f, [0 5])  
grid
```



Слика П.12.3.1. Изглед на функцијата П.12.3.1

каде што ја користиме наредбата `fplot` во која што се внесуваат два параметри. Првиот параметар е името на функцијата која што сакаме да ја цртаме, а вториот параметар е матрица со една редица и две колони која што ги содржи почетната и крајната вредност на интервалот во кој што сакаме да ја нацртаме функцијата.

Тоа значи дека за случајот под а) можеме да направиме една програма чија што содржина е

programi/matlab/fplot_primer_1a.m

```
1 f = @(x) x .* exp(-x) - 0.2;  
2 fplot(f, [0 5]); grid
```

б) Во овој случај функцијата (П.12.3.1) ќе ја дефинираме во посебна `m`-датотека на следниот начин

programi/matlab/funkcija_1.m

```
1 function y = funkcija_1(x)  
2 y = x .* exp(-x) - 0.2;
```

од каде што се гледа дека функциите се дефинираат така што прво се пишува клучниот збор `function` а потоа следуваат листа на променливите кои што дадената функција ги пресметува (во овој случај тоа е само променливата `y`, доколку имаше повеќе променливи тие ќе беа ставени во средни загради одделени со запирки), знакот за еднаквост, името на функцијата и на крајот во мали загради листа на променливи одделени со запирки кои што се влезни параметри во функцијата (во овој случај тоа е само променливата `x`). И овде, како проверка за исправноста на нашата функција можеме да напишеме

```
>> funkcija_1(1)  
ans =  
    0.1679
```

За случајот под б) целата програма за цртање на функцијата е следната

programi/matlab/fplot_primer_1b.m

```
1 fplot(@funkcija_1, [0 5]); grid
```

каде што забележуваме дека пред името на функцијата која влегува како параметар во наредбата `fplot` го имаме ставено знакот `@` со што сме кажале дека предметната функција е дефинирана во `m`-датотека со име `funkcija_1.m`.

□ □ □

Пример 12.4. Да се нацрта функцијата $f(x)$ од една променлива дефинирана на следниот начин

$$f(x) = \begin{cases} xe^{-x} - 0,2 & x < 3, \\ \frac{x - 8}{100} & x \geq 3. \end{cases} \quad (\text{П.12.4.1})$$

во интервалот $0 \leq x \leq 5$.

Решение

За решавање на овој пример задолжително треба да дефинираме функција во посебна `m`-датотека затоа што е невозможно функцијата дефинирана со изразот (П.12.4.1) да ја напишеме во една линија. Поради тоа ја дефинираме следната функција

programi/matlab/funkcija_2.m

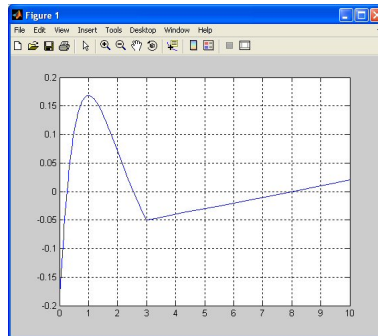
```
1 function y = funkcija_2(x)
2 if x < 3
3     y = x .* exp(-x) - 0.2;
4 else
5     y = (x - 8)/100;
6 end
```

Во неа ја користиме наредбата `if` со која се дефинира извршување на една или друга команда во зависност од тоа дали е исполнет условот кој што е даден со неа. Ако условот е исполнет $x < 3$ тогаш се извршува командата `y = x .* exp(-x) - 0.2;`, а во спротивно (`else`) се извршува командата `y = (x - 8)/100;`. На крајот од наредбата `if` секогаш следува `end`. Програмата за цртање на оваа функција го има следниот изглед

programi/matlab/fplot_primer_2.m

```
1 fplot(@funkcija_2, [0 5]); grid
```

и со неа ја добиваме сликата П.12.4.1.



Слика П.12.4.1. Изглед на функцијата П.12.4.1



Пример 12.5. Да се најдат нулите на функцијата (П.12.3.1) во интервалот $0 \leq x \leq 5$.

Решение

Од графикот на функцијата (П.12.3.1) којшто е даден на сликата П.12.3.1 забележуваме дека таа во интервалот $0 \leq x \leq 5$ има две нули. Едната нула се наоѓа околу 0,25 додека другата се наоѓа околу 2,5.

Точната вредност на првата нула ќе ја одредиме со помош на наредбата `fsolve` на следниот начин

```
>> f = @(x) x .* exp(-x) - 0.2;  
>> x = fsolve(f, 0.25)
```

Equation solved.

`fsolve` completed because the vector of function values is near zero as measured by the default value of the function tolerance, and the problem appears regular as measured by the gradient.

<stopping criteria details>

```
x =  
0.2592
```

од каде што се гледа дека во наредбата `fsolve` како параметар прво се пишува името на функцијата за која што сакаме да ја пресметаме нулата, а потоа почетното решение за самата нула.

До истиот резултат ќе дојдеме и ако напишеме

```
x = fsolve(@funkcija_1, 0.25)
```

затоа што претходно веќе ја имеме дефинирано функцијата `funkcija_1`. Бидејќи таа е дефинирана во посебна `m`-датотека пред нејзиното име го ставаме знакот `@`.

Точната вредност на втората нула ќе ја одредиме со помош на наредбата `fsolve` на следниот начин

`x = fsolve(f, 2.5)`

со што добиваме дека е $x = 2,5426$.

□ □ □

12.4 Изводи и интеграли

Иако во математиката за пресметувањето на изводи и интеграли на функции постојат аналитички постапки кои што се вградени во самиот MATLAB во електротехниката ни е сосема доволно доколку вредностите на интегралите и изводите ги пресметуваме нумерички. На крајот од каква било анализа која што ја прават инженерите резултатите се сведуваат на добивање на решение во нумеричка форма со конкретни вредности за одредени величини како што се напони, струи, моќности, должини, висини итн. додека аналитичките изрази за сите тие величини се без никакво дополнително значење. Поради тоа тука ќе се задржиме само на нумеричките методи.

Пример 12.6. Да се пресмета вредноста на првиот извод на функцијата $f(x) = x^2 - 3x + 1$ за вредност на $x = 1$.

Решение

По дефиниција првиот извод на една функција е даден со изразот

$$f'(x) = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{f(x+h) - f(x)}{h},$$

којшто ние тука ќе го искористиме за нумерички да го пресметаме изводот. За таа цел е напишана следната кратка програма.

programi/matlab/prv_izvod.m

```
1 f = @(x) x^2 - 3*x + 1;
2 h = 1e-6;
3 izvod = (f(1+h) - f(1))/h;
4 fprintf('izvod = %.8f\n', izvod);
```

Со активирање на програмата го добиваме следниот резултат

```
>> prv_izvod
izvod = -0.99999900
```

со што сме добиле резултат кој што е многу близок до точната вредност (која што изнесува -1) и при тоа сме претпоставиле дека е $h = 10^{-6}$.

□ □ □

Пример 12.7. Да се пресмета вредноста на интегралот

$$\int_0^1 (x^2 - 3x + 1) dx,$$

со помош на функцијата `integral`.

Решение

Интегралот можеме да го решиме со помош на наредбата `integral` на следниот начин

programi/matlab/integral_1.m

```
1 f = @(x) x.^2 - 3*x + 1;
2 I = integral(f, 0, 1);
3 fprintf('I = %.8f\n',I);
```

со што добиваме

```
>> integral_1
I = -0.16666667
```

од каде што се забележува дека со само две команди во командниот прозорец го добивме точниот резултат кој изнесува $-1/6$. Наредбата `integral` се повикува така што како параметри се задаваат подинтегралната функција и долната и горната граница на интегралот. Подинтегралната функција треба да е напишана така што ќе оперира со одделните елементи од векторот x . Поради тоа за квадратниот член пишуваме `x.^2`.

□ □ □

Пример 12.8. Да се пресмета вредноста на интегралот

$$\int_0^1 \frac{x e^x}{(1+x)^2} dx$$

и да се провери дали решението е исто со вредноста $\frac{e}{2} - 1$ која што е најдена од табела со решени интегрални.

Решение

Решението на интегралот го добиваме со следната програма

programi/matlab/integral_2.m

```
1 f = @(x) x .* exp(x) ./ (1 + x).^2;
2 I_presmetan = integral(f, 0, 1);
3 I_tablicen = exp(1)/2 - 1;
4 fprintf('I_presmetan = %.12f\n',I_presmetan);
5 fprintf('I_tablicen = %.12f\n',I_tablicen);
```

со чие активирање добиваме

```
>> integral_2
I_presmetan = 0.359140914230
I_tablicen = 0.359140914230
```

од каде што гледаме дека пресметаната вредност на интегралот е еднаква со табличната со точност од 12 децимали.

□ □ □

12.5 Функции со повеќе променливи

Пример 12.9. Разгледуваме функција со 2 променливи, со која што е опишан потенцијалот во просторот, дефинирана на следниот начин

$$z = x^2 - 2y^2 + xy + x + y + 1.$$

Да се нацрта површината во просторот која ја опишува оваа функција за $-5 \leq x \leq 5$ и $-5 \leq y \leq 5$. Исто така, да се нацртаат еквипотенцијалните линии и градиентот на функцијата.

Решение

Дадената функција во MATLAB ја дефинираме на следниот начин
`f = @(x,y) x.^2 - 2*y.^2 + x.*y + x + y + 1;`

додека за дефинирање на опсегот на промена на променливите x и y ја користиме командата `meshgrid`

```
[x,y] = meshgrid(-5:0.5:5,-5:0.5:5);
```

која во дадениот случај формира матрици x и y со димензии 21×21 во кои вредностите во редиците и колоните се менуваат од -5 до 5 со чекор од $0,5$ со што добиваме растер од точки во кои ќе треба да ја пресметаме вредноста на функцијата.

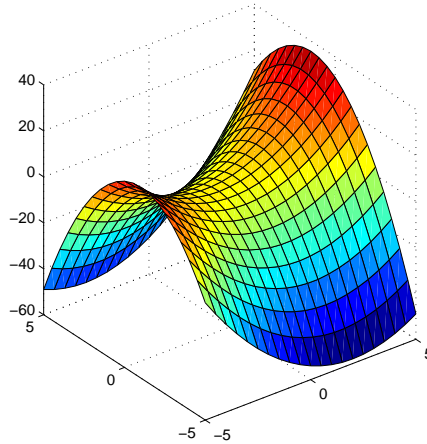
Вредностите на функцијата ги пресметуваме со наредбата `z = f(x,y)`, а потоа површината во просторот ја цртаме со наредбата `surf`. Целата програма го има следниот изглед

programi/matlab/crtaj_1a.m

```
1 f = @(x,y) x.^2 - 2*y.^2 + x.*y + x + y + 1;  
2 [x,y] = meshgrid(-5:0.5:5,-5:0.5:5);  
3 z = f(x,y);  
4 surf(x,y,z); axis square
```

и со неа е добиена сликата П.12.9.1.

Еквипотенцијалните линии ги цртаме со програмата `crtaj_1b.m` во која што само последната редица е различна во однос на програмата `crtaj_1a.m`. Тука ја користиме командата `contour` која ги црта еквипотенцијалните линии, а потоа со командата `clabel` пишуваме ознаки врз еквипотенцијалните линии со кои е дадена вредноста на функцијата. На таков начин ја добиваме сликата П.12.9.2.



Слика П.12.9.1

programi/matlab/crtaj_1b.m

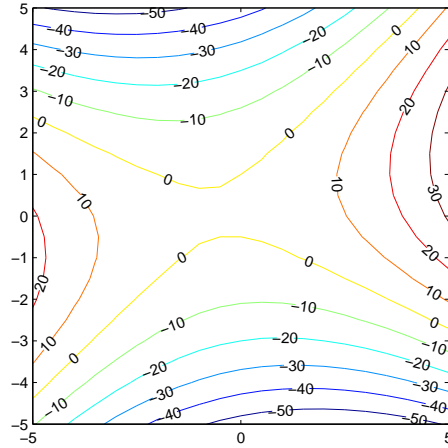
```
1 f = @(x,y) x.^2 - 2*y.^2 + x.*y + x + y + 1;  
2 [x,y] = meshgrid(-5:0.5:5,-5:0.5:5);  
3 z = f(x,y);  
4 [c, h] = contour(x,y,z); clabel(c, h); axis square
```

Градиентот на функцијата го цртаме со програмата `crtaj_1c.m`, во која исто како и претходно на почетокот ги пресметуваме матриците x , y и z . Потоа, со наредбата `gradient` ги определуваме матриците gx и gy кои ги содржат компонентите на градиентот во правец на x и y оската, соодветно.

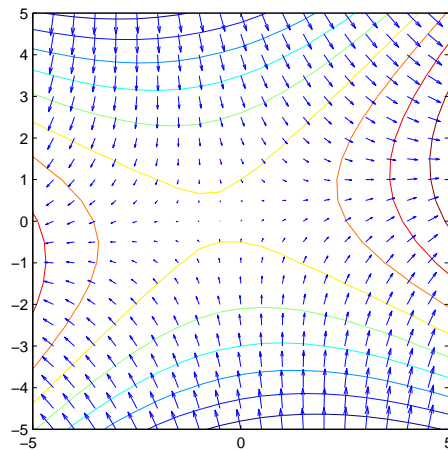
На сликата П.12.9.3 се прикажани еквипотенцијалните линии, кои се добиваат со наредбата `contour`, како и векторите со кои е даден градиентот во повеќе точки од просторот. Векторите на градиентот се цртаат со помош на наредбата `quiver` која ги користи претходно пресметаните вредности за gx и gy .

programi/matlab/crtaj_1c.m

```
1 f = @(x,y) x.^2 - 2*y.^2 + x.*y + x + y + 1;  
2 [x,y] = meshgrid(-5:0.5:5,-5:0.5:5);  
3 z = f(x,y);  
4 [gx,gy] = gradient(z,0.5,0.5);  
5 contour(x,y,z); hold on  
6 quiver(x,y,gx,gy); hold off; axis square
```



Слика П.12.9.2



Слика П.12.9.3



Пример 12.10. Разгледуваме спроводник поставен во неограничена средина со специфична отпорност $\rho = 150 \Omega\text{m}$, при што е познато дека од него истекува струја $I = 10 \text{ A}$. Почетната и крајната точка на спроводникот се $P(-1, 0, -1)$ и $Q(1, 0, -1)$. Потребно е да се пресмета потенцијал во точката $T(x, y, 0)$ при што е $-2 \leq x \leq 2$ и $-2 \leq y \leq 2$.

Познато е дека потенцијалот во точката T се пресметува со следниот израз

$$\varphi = \frac{\rho I}{4\pi d} \ln \frac{r_1 + r_2 + d}{r_1 + r_2 - d}, \quad (\text{П.12.10.1})$$

каде што d е должина на спроводникот, а r_1 и r_2 се растојанија од неговите крајни точки до точката T .

Решение

Пресметките ќе ги направиме така што ќе дефинираме функција `presmetaj_fi.m` која пресметува потенцијал во една точка, а потоа во `2 for` циклуси ќе ја поминеме целата област $-2 \leq x \leq 2$ и $-2 \leq y \leq 2$ и за секоја точка ќе ја повикуваме функцијата `presmetaj_fi.m`.

Влезни параметри во функцијата `presmetaj_fi.m` се координатите на точките T, P и Q кои се задаваат во форма на редици со 3 колони, како и величините ρ и I .

Во редиците 2-4 се пресметуваат d, r_1 и r_2 користејќи ја наредбата `norm`, а во редицата 5 е напишан изразот (П.12.10.1).

programi/matlab/presmetaj_fi.m

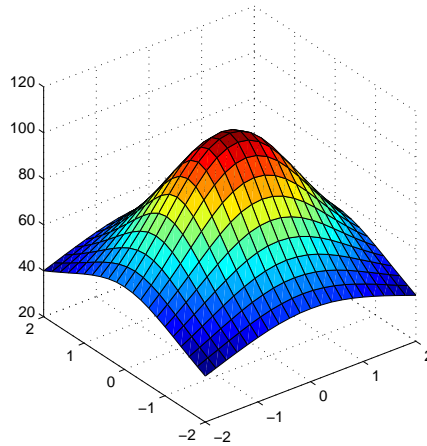
```
1 function fi = presmetaj_fi(T,P,Q,rho,I)
2 d = norm(P-Q);
3 r1 = norm(P-T);
4 r2 = norm(Q-T);
5 fi = rho*I/(4*pi*d)*log((r1+r2+d)/(r1+r2-d));
```

Пресметката и цртањето на потенцијалот во просторот се прави со помош на следната програма.

programi/matlab/crtaj_fi.m

```
1 P = [-1 0 -1]; Q = [ 1 0 -1]; rho = 150; I = 10;
2 [x,y] = meshgrid(-2:0.2:2);
3 [m,n] = size(x);
4 fi = zeros(m,n);
5 for i = 1:m
6     for j = 1:n
7         T = [x(i,j) y(i,j) 0];
8         fi(i,j) = presmetaj_fi(T,P,Q,rho,I);
9     end
10 end
11 surf(x,y,fi); axis square
```

Во редицата 1 се задаваат податоците за спроводникот, а потоа со `meshgrid` се дефинира областа за промена на x и y . Во редиците 3-4 се дефинира матрица `fi` со сите нули, а во редиците 5-10 во `2 for` циклуса се пресметува потенцијалот во секоја точка T дефинирана со координатите $(x_{ij}, y_{ij}, 0)$. На крајот се црта распределбата на потенцијалот која е прикажана на сликата П.12.10.1.



Слика П.12.10.1

Во опишаната постапка податоците за спроводникот ги задаваме со 2 матрици P и Q и 2 скалари rho и I. Наместо тоа, во MATLAB можеме да дефинираме една структура со четири полиња чии имиња ќе бидат претходно наведените променливи. Тоа е направено во редицата 1 од програмата crtaj_fi_1.

programi/matlab/crtaj_fi_1.m

```
1 Z.P = [-1 0 -1]; Z.Q = [ 1 0 -1]; Z.rho = 150; Z.I = 10;
2 [x,y] = meshgrid(-2:0.2:2);
3 [m,n] = size(x);
4 fi = zeros(m,n);
5 for i = 1:m
6     for j = 1:n
7         T = [x(i,j) y(i,j) 0];
8         fi(i,j) = presmetaj_fi_1(T,Z);
9     end
10 end
11 surf(x,y,fi); axis square
```

Тука, структурата со која е опишан спроводникот е означена со Z и таа го има следниот изглед.

```
>> Z
Z =
    P: [-1 0 -1]
    Q: [ 1 0 -1]
    rho: 150
    I: 10
```

За да пристапиме до одделните податоци на спроводникот пишуваме Z.P, Z.Q, Z.rho и Z.I како што тоа е направено во функцијата pres-

metaj_fi_1 која во овој случај го пресметува потенцијалот во точката T.

programi/matlab/presmetaj_fi_1.m

```
1 function fi = presmetaj_fi_1(T,Z)
2 d = norm(Z.P-Z.Q);
3 r1 = norm(Z.P-T);
4 r2 = norm(Z.Q-T);
5 fi = Z.rho*Z.I/(4*pi*d)*log((r1+r2+d)/(r1+r2-d));
```

Предноста во користењето на структура со повеќе полиња, наместо повеќе променливи е во тоа што бројот на влезни податоци во функциите се намалува, а исто така листата со аргументи нема да се смени во случај да треба да додадеме нова информација за објектот од интерес. Така на пример, ако треба да го запишеме и пречникот на спроводникот ќе напишеме $Z.d = 0.009$ и тој автоматски ќе биде префрлен во сите функции кои ја користат структурата Z. При тоа, нема да има потреба да ја менуваме листата со аргументи во дефинициите на функциите и на местата каде што тие функции се повикуваат.

□ □ □

13

СПИСОК НА КРАТЕНКИ

АПВ	Автоматско повторно вклучување
ВН	Висок напон, високонапонски
ДМ	Дистрибутивна мрежа
ЕЕМ	Електроенергетска мрежа
ЕЕО	Електроенергетски објект(и)
ЕЕС	Електроенергетски систем
ЗС	Заземјувачки систем
НВ	Надземен вод
НН	Низок напон, нисконапонски
НТ	Неутрална точка (свездиште намотките на трансформатор)
СКВ	Струја на куса врска
СН	Среден напон, среднонапонски
ТС	Трансформаторска станица
ТС ВН/СН	Трансформаторска станица висок/среден напон
ТС СН/НН	Трансформаторска станица среден/низок напон
ФХ	Фреквентен хистограм (или функција на густина на веројатноста на случајна променлива)

14

РЕГИСТАР НА ПОВАЖНИТЕ ОЗНАКИ СО ЗНАЧЕЊА

A	Матрица на инциденција на електрично коло (поглавје 9)	E_c	Потенцијална разлика на чекор
a	Распон (растојание помеѓу два соседни столба кај НВ)	$E_{c,max}$	Максимална потенцијална разлика на чекор
α	Матрица на сопствени и меѓусебни отпорности на елементите од заземјувач (поглавје 3)	E_d	Потенцијална разлика на допир
α	Импулсен коефициент на заземјувач (поглавје 5)	$E_{d,max}$	Максимална потенцијална разлика на допир
D_{ek}	Еквивалентно растојание помеѓу спроводникот (заштитното јаже) и фиктивниот спроводник на повратниот пат на струјата во земјата	f	Фреквенција на струјата
D_s	Еквивалентен пречник на плоча со која која се симулира човековото стопало	φ	Потенцијал создаден од струите на одведување во земјата
D_{zm}	Средно-геометриско растојание помеѓу заштитното јаже и фазните спроводници кај НВ	$\varphi(x, y)$	Функција на распределба на потенцијалите (обично по површината на земата)
E	Јачина на електричното поле создадено од струите во земјата	φ_z	Потенцијал на заземјувачот
E	Матрица колона (3×1) на индуцирани е.м. сили во плаштовите кај трифазен кабел со метални плаштови за жилите (поглавје 8)	φ_0	Потенцијал на далечната (референтна) земја. (Обично се усвојува $\varphi_0 = 0$).
		φ_T	Потенцијал во точката „Т“
		γ	Константа на простирање на долг спроводник (метален плашт) положен во земја
		I	Струја (општо)
		I_A, I_B, I_C	Фазни струи во трифазен вод (кабел)
		I	Матрица (вектор) колона на струите на одведување во земја од одделните елементи

	(електроди) на заземјувач (поглавје 3)	I_p	Матрица (вектор) колона на струите на одведување во земја од одделните елементи на пасивниот заземјувач (поглавје 4)
I	Матрица колона (3×1) на струи во плашовите кај трифазен кабел со метални плаштови за жилите (поглавје 8)	J	Густина на струјата во земјата
I	Матрица (вектор) колона на струите во гранките од електрично коло (поглавје 9)	J	Матрица колона на инјектирани струи во јазлите од електрично коло (поглавје 9)
I_a	Вкупна струја на одведување од активниот заземјувач (поглавје 4)	J_p, J_q, J_k	Фиктивни струјни генератори со чија помош се опфаќа влијанието на заемната спрега фазен спроводник–заштитно јаже кај надземен вод (поглавје 7)
I_p	Вкупна струја на одведување од пасивниот заземјувач (поглавје 4)		Струја на еквивалентниот струен генератор на еднофазниот еквивалент на трифазен кабел (поглавје 8)
I_ξ	Струја што минува низ човековото тело при електричен удар	J_e	
I_{doz}	Дозволена струја на електричен удар		
I_{F50}	Струја која кај 50% од погодените лица предизвикува вентрикуларна фибрилација	k_i	Фактор на изнесување на потенцијалот кај надземен вод или кабел
I_{kv}, I_{KV}	Струја на куса врска (земјоспој), струја на грешка	L_Σ	Сумарна должина на краците кај зракастите заземјувачи
I_{k1}, I_{k2}	Струи ма куса врска кои од двете страни течат кон самото место на кусата врска ($I_{k1} + I_{k2} = I_{kv}$, поглавје 7)	μ	Магнетска пермиабилност на материјал
I_m, I_M	Максимална (темена) вредност на ударната струја громот	μ_r	Релативна магнетска пермиабилност на материјал
I_{MZ}	Струја на одведување во земјата од мрежест заземјувач	N_g	Годишен (просечен) број на удари на гром на 1 km ² во дадена област
$I_{\text{плашт}}$	Струја во металниот плашт на кабел	Q	Количество на електрицитет низ човековото тело при електричен удар
I_z	Струја на одведување во земјата од заземјувач (општо)	r	Активна отпорност по единица должина на спроводник (заштитно јаже)
I_a	Матрица (вектор) колона на струите на одведување во земја од одделните елементи на активниот заземјувач (поглавје 4)	r	Матрица (квадратна) на сопствените и меѓусебни отпониности на елементите (електродите) од еден заземјувач (поглавје 3)
		r_f	Редукционен фактор кај надземен вод или кабел

R_i	Ударна (импулсна) отпорност на распростирање на заземјувач при одведување на импулсни струи	U_a	Напон на активниот заземјувач (поглавје 4)
		U_p	Напон на пасивниот заземјувач (поглавје 4)
r_z	Активна отпорност по единица должина на „повратниот спроводник“ во земјата според моделот на Карсон и Риденберг (поглавје 7)	U_c	Напон на чекор
		$U_{c.max}$	Максимален напон на чекор
		$U_{c.doz}$	Дозволен напон на чекор
		U_d	Напон на допир
		$U_{d.max}$	Максимален напон на допир
		$U_{d.doz}$	Дозволен напон на допир
R_s	Преодна отпорност на едно човеково стопало	$U_{подн.}$	Поднослив ударен напон на изолација
R_{pr}	Преодна отпорност на контактот човекови стопала–тло	U_z	Напон на заземјувач (општо)
		W	Енергија (општо)
R_{ξ}	Отпорност на човековото тело	W	Количество на топлина ослободена во човековото тело при електричен удар
$\mathfrak{R}, \mathfrak{R}_z$	Константа на распростирање на заземјувач (отпорност на распростирање на заземјувачот поставен во хомогено тло со специфична отпорност $\rho = 100 \Omega m$).	x	Индуктивна отпорност по единица должина на спроводник (заштитно јаже)
		y	Инверзна матрица на матрицата $r, y = r^{-1}$, (поглавје 3)
R_z	Отпорност на распростирање на заземјувач	Y	Матрица (квадратна) на адмитанции на електрично коло (поглавје 7 и 9)
ρ	Специфична отпорност на материјалот (почвата)	Y_{ek}	Еквивалентна адмитанција (или влезна адмитанција во заземјувачки систем)
ρ_p	Специфична отпорност на површинскиот слој земја		
ρ_z	Специфична отпорност на земјата (почвата)	Y_{p1}, Y_{p2}	Елементи од π -заменската шема на вод
s_d	Фактор на допир		
s_c	Фактор на чекор	z	Импеданција по единица должина на спроводник/јаже ($z = r + jx$)
σ	Специфична спроводност на материјал (почва), $\sigma = 1/\rho$	Z	матрица (квадратна) на импеданции на електрично коло (поглавје 7 и 9)
T_d	Просечен број на денови со грмежи во дадена област		
U	Напон (општо)	Z	Матрица (3×3) на сопствени и меѓусебни импеданции на металните плаштови кај трифазен кабел со метални плаштови за жилите (поглавје 8)
U	Матрица колона на напоните на јазлите во електрично коло (поглавје 7 и 9)		
U_{GR}	Матрица колона на напоните на гранките во електрично коло (поглавје 9)	Z_c	Карактеристична импеданција на долг
U_f	Фазен напон (кај трифазните системи е $U_f = U/\sqrt{3}$)		
U_n	Номинален напон		

Заземјувачи и заземјувачки системи во електроенергетските мрежи

	спроводник (метален плашт) положен во земја	Z_m	Меѓусебна импеданција по единица должина
Z_e	Еквивалентна импеданција на еднофазниот еквивалент на трифазен кабел (поглавје 8)	Z_p	Елемент од пи-заменската шема на вод
		Z_r	Импеданција на заштитното јаже во еден распон од НВ
Z_{ek}	Еквивалентна импеданција (или влезна импеданција во заземјувачки систем)	Z_{vl}, Z_{vL}	Влезна импеданција (види еквивалентна импеданција Z_{ek})
Z_{GR}	Матрица (квадратна, дијаго- нална) на импеданциите на гранките во електрично коло (поглавје 9)	Z_z	Импеданција на распростирање на заземјувач (заземјувачки систем)

15

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Pravilnik o tehničkim normativima za uzemljenje elektroenergetskih postrojenja nazivnog napona iznad 1000 V. Sl. list SRJ, br. 61, 1995
- [2] J. Nahman "Uzemljenje neutralne tačke distributivnih mreža", Naučna knjiga, Beograd 1980.
- [3] J. Nahman, V. Mijailović „Razvodna postrojenja“, Akademska misao, Beograd 2002.
- [4] J. Nahman, V. Mijailović „Odbrana poglavlja iz visokonaponskih postrojenja“, Akademska misao, Beograd 2002
- [5] J. Nahman, V. Mijailović, „Razvodna postrojenja“, Akademska misao, Beograd 2005.
- [6] L. L. Grigsby, "The Electric Power Engineering Handbook", Auburn, Alabama, IEEE PRESS, 2001, part, SUBSTATION GROUNDING, Richard. P. Keil.
- [7] IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding, ANSI/IEEE Std 80-1996, New York.
- [8] J. Nahman, „Numerički postupak za proračun medjusobnih otpornosti tankih pravoliniskih provodnika“, ELEKTROTEHNIKA, ELTHB2, 27 Zagreb , Maj - Juni 1984, pp.27-32.
- [9] Збирка техничких препорука ТП-1 до ТП-15 ЕПС, издање, март 2001.
- [10] Техничка препорука ТП-23, УДРУЖЕНА ЕЛЕКТРОПРИВРЕДА-БЕОГРАД, 1982 г.
- [11] Техничка препорука ТП-7, ЕПС.
- [12] Техничка препорука 9, Електропривреде Србије, за извођење уземљења и уземљивача стубова надземних електроенергетских водова номиналног напона 1, 10, 20, 35 и 110 kV.
- [13] Правилник за технички нормативи за градба на надземни електроенергетски водови со номинален напон од 1 kV до 400 kV (Сл. лист на СФРЈ бр.65/1988).
- [14] Moussa A.: "The soil ionization gradient associated with discharge of high currents into concentrated electrodes". IEEE Trans. On PWRD, Vol. 9 No. 2/1994.
- [15] Р. Миновски, Р. Ачковски. „Студија за можностите за подобрување на перформансите на заземју-вачкиот систем на далноводот 110 kV Скопје – Козјак – Самоков“. Студија работена за потребите на Електростопанство на Македонија, ЕТФ-Скопје, 2004.

- [16] J. He, R. Zeng, Y. Tu, J. Zou, S. Cheng, and Z. Guan "Laboratory Investigation of Impulse Characteristic of Transmission Tower Grounding Devices", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.18 No.3/2003, pp. 994-1001.
- [17] Н. Ацевски, Р. Ачковски "Анализа на карактеристиките на типските форми на заземјувачи на ТС СН/НН на подрачјето на Охрид", МАКО СИГРЕ, III Советување, R 23-07.
- [18] Р. Ачковски, Н. Ацевски „Избор на форма, димензии и локација на работен заземјувач на ТС СН/НН“, Трето советување, МАКО-ЦИГРЕ, Охрид, 2001, Р 23-05.
- [19] Р. Ачковски, Н. Ацевски „Влијание на формата и димензиите на работниот заземјувач кај ТС СН/НН врз неговата отпорност на распростирање“, I Советување на ЕСМ, Битола, 16-18 декември 1999 г., стр. 174-177.
- [20] Р. Ачковски „Надземни и кабелски водови“, учебник. ЕТФ-Скопје, 1995.
- [21] Р. Ачковски „Збирка задачи од областа на надземните и кабелските водови“, учебно помагало. ЕТФ-Скопје, 1995.
- [22] Р. Ачковски „Преносни и дистрибутивни системи“, - учебник. Скопје, ЕТФ, 1995.
- [23] Р. Ачковски „Високонапонски мрежи и системи“, - учебник. Скопје, ЕТФ, 1995.
- [24] Д. Рајчиќ „Вовед во дистрибутивни електроенергетски системи“, - учебник. Скопје, ЕТФ, 1995.
- [25] Р. Ачковски „Заземјувачи на столбовите од далекуводите - елементи на заземјувачкиот систем на електроенергетските мрежи“, Семинар за електроинженери 1997.
- [26] Современа проблематика за заземјување, часопис "Електротехника" бр. 1-2, Загреб, 1984.
- [27] Р. Ачковски, М. Тодоровски и др. „Подобрување на третманот на неутралната точка во средно-напонските дистрибутивни мрежи на ЕСМ-ЕВН и анализа на состојбата во заземјувачките системи на одреден број среднонапонски дистрибутивни мрежи заедно со припадните напојни трафостаници“, ФЕИТ – Скопје, октомври, 2007.
- [28] Р. Ачковски, М. Тодоровски „Заземјувачи и заземјувачки системи во електроенергетските мрежи. Прв семинар за обука на стручњаците од ЕСМ-ЕВН во областа на заземјувањето и заземјувачките системи во дистрибутивните мрежи“, ФЕИТ – Скопје, мај, 2007.
- [29] Р. Ачковски, М. Тодоровски „Решавање на состојбата во заземјувачките системи за време на земјоспој. Втор семинар за обука на стручњаците од ЕСМ-ЕВН во областа на заземјувањето и заземјувачките системи во дистрибутивните мрежи“, ФЕИТ – Скопје, септември, 2007.
- [30] Н. Роџар, „Rasklopna postrojenja“, Tehnička knjiga, Zagreb, 1973.
- [31] Прописи за техничките мерки за погон и одржување на електроенергетските постројки, Сл. лист на СФРЈ бр. 19/68.
- [32] Правилник за техничките нормативи за електроенергетски постројки со номинален напон над 1000 V. Сл. лист на СФРЈ бр. 4/74 и измени во Сл. лист бр. 13/78.

- [33] Правилник за техничките нормативи за заштита на нисконапонските мрежи и припадните трансформаторски станици, Сл. лист на СФРЈ бр. 13/78.
- [34] Правилник за техничките нормативи за изградба на надземни електроенергетски водови. Сл. лист на СФРЈ бр. 65/88.
- [35] Правилник за техничките нормативи за заземјување на електроенергетски постројки со номинален напон над 1000V, Сл. лист на СРЈ бр. 61/95.
- [36] Правилник за измени и дополнувања на Правилникот за техничките нормативи за заштита на нисконапонските мрежи и припадните трансформаторски станици, Сл. лист на СРЈ бр. 37/95.
- [37] Упатства за користење на програмите "Neutral", "Zazem" и "ZSPOJ", Институт за ПЕЕС, Електротехнички факултет ☐ Скопје.
- [38] Техничка препорака бр. 6. Заземјување на неутрална точка на електродистрибутивните мрежи 110 kV, 35 kV, 20 kV, 10 kV и 0,4 kV, Пословна заједница електродистрибуција Србије, 2003.
- [39] Техничка препорака за проектирање, изградба и одржување на заземјувања на електро-енергетски постројки (ТП-23), Здружена електропривреда Београд, јануари 1982.
- [40] Техничка препорака бр. 4а - Примена на релејна заштита и локална автоматика во дистрибутивните мрежи 10 kV, 20 kV, 35 kV и 110 kV, Пословна заједница електродистрибуција Србије, 2003.
- [41] Техничка препорака бр. 7. Изведување на заземјување во електродистрибутивните трансформаторски станици 35/10(20) kV и 10(20)/0,4 kV, Пословна заједница електродистрибуција Србије, 2003.
- [42] Техничка препорака бр. 9. Изведување на заземјување и заземјувачи на столбови на електроенергетски водови 110 kV, 35 kV, 20 kV, 10 kV и 1 kV, Пословна заједница електро-дистрибуције Србије, 2003.
- [43] IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding, ANSI/IEEE Std 80-1996, New York.
- [44] L. L. Grigsby, "The Electric Power Engineering Handbook", Auburn, Alabama, IEEE PRESS, 2001, part, SUBSTATION GROUNDING, Richard. P. Keil.
- [45] William, H. Kersting, "Distribution System Modeling and Analysis", 2002 by CRC Press LLC.
- [46] Charles F. Dalziel, "Dangerous Electric Currents" Transaction V. 65 August - Septembar 1946 (579-584).
- [47] Charles F. Dalziel, "Electric shock hazard", IEEE - Spectrum, Februaru 1972, (41 - 48).
- [48] G. Biegelmeier, W. R. Lee, "New considerations on the threshold of ventricular fibrillation for a. c. shocks at 50/60 Hz". IEEE Proceeding Vol. 127 No. 2 March 1980 (103-110).
- [49] W. R. Lee, "Treshold of ventikular fibrillation" RGE - 10/81, October 1981, (712-717).
- [50] D. Shirmohammadi, H. W. Hong, A. Semlyen, G. X. Luo, " A Compensation-Based Power Flow Method for Weakly Meshed Distribution and Transmission Networks", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 3, No. 2, pp. 735-762, May, 1988.

- [51] G. X. Luo, A. Semlyen, "Efficient Load Flow for Large Weakly Meshed Networks", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 5, No. 4, pp. 1309-1316, November, 1990.
- [52] J. Ma, F. Dawalibi, R. Southey, "On the equivalence of uniform and two-layer soils to multilayer soils in the analysis of grounding systems", IEE Proc.-Gener. Transm. Distrib. Vol. 143, No. 1, January 1996, pp. 49-55.
- [53] Dawalibi, Farid, and Nelson Barbeito, "Measurements and computations of the performance of system buried in multi layer soils", (91 WM 037-2), T-PWRD Oct 91, pp. 1483-1490.
- [54] Dawalibi, F. P, J.Ma, and R. D. Southey, "Behavior of grounding systems in multilayer soils a parametric analysis", T-PWRD Apr 94, pp. 1090-1097.
- [55] Sverak. J. G, Wen Wang, Yvon Gervais, Xvan-Dai Do, Dinkar Mukhedkar, "A probabilistic method for the design of power grounding systems", (89 WM 068-6), T-PWRD Jul 92, pp. 1196-1206.
- [56] Wang, W., Y.Gervais, D.Mukhedkar, "Probabilistic Evaluation of Human Safety Near HVDC Ground Electrode", (85 SM 318-1); T-PWRD Jan 86, pp. 105-110.
- [57] B. Thapar, V. Gerez, A. Balakrishnan, D. Blank, "Substation grounding grids intertied with buried conductors", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 7, No. 3, July 1992, pp. 1207-1211.
- [58] B. Thapar, V. Gerez, A. Balakrishnan, D. Blank, "Evaluation of ground resistance of a grounding grid of any shape", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 6, No. 6, April 1990, pp. 640-645.
- [59] Thapar, B, V.Gerez, and H.Kejriwal, "Reduction factor for the ground resistance of the foot in substation yards", T-PWRD Jan 94, pp. 360-368.
- [60] B.Thapar, V.Gerez, "Equivalent Resistivity of Nonuniform Soil for grounding Grid Design", Apr 95 (94 SM 387-1), T-PWRD.
- [61] Thapar, B, and Z.A.Alaywan, "Increasing of ground resistance of human foot in substations yards", (88 SM 714-8), T-PWRD Jul 89, pp. 1695-1700.
- [62] Greiss. H, D. Mukhedkar, J.L.Houle, X.D.Do, and Y.Gervais, "HVDC ground electrode heat dissipation in an N-layer soil", (87 SM 516-8), T-PWRD Oct 88, pp. 1369-1374.
- [63] Sarmiento, H, D.Mukhedkar, V.Ramachandran, "An extension to the study of earth-return mutual coupling effects in ground impedance field measurements", (86 SM), T-PWRD Jan 88, pp.96-101
- [64] Lazzara, J, and N.Barbeito, "Simplified two layer model substation ground grid design methodology", (90 WM 131-3), T-PWRD Oct 90, pp. 1741-1750.
- [65] Joy, E.B., and R.E.Wilson, "Accuracy study of the ground grid analysis algorithm" (86 WM 124-2), T-PWRD Jul 86, pp. 97-103.
- [66] Rogers. E. J. and J. F. White, "Mutual coupling between finite lengths of parallel or angled horizontal earth return conductors", (88 WM 039-0), T-PWRD Jan 89, pp. 103-113.
- [67] Takahashi, T., and T.Kawase, "Analysis of apparent resistivity in a multi-layer earth structure", (89 SM 626-3), T-PWRD Apr 90, pp. 64-612.
- [68] Chow, Y.L., and M.M.A.Salama, "A simplified method for calculating grounding grid resistance", T-PWRD Apr 94, pp. 736-742.
- [69] M.M.A.Salama, M.M.El Sherbiny, Y.L.Chow, "A Formula for Resistance of Substation Grounding Grid in Two-Layer Soil" Jul 95 (95 WM 001-8), T-PWRD.

- [70] M.M.Esherbiny, Y.L.Chow, M.M.A.Salama, "A Fast and Accurate Analysis of Grounding Resistance of a Driven Rodbed in a Two-Layer Soil", Apr 96 (95 SM 362-4), T-PWRD.
- [71] Y.L.Chow, M.M.Esherbiny, M.M.A.Salama, "Resistances Formulas of Grounding Systems in Two-Layer Earth", WM 96, T-PWRD
- [72] P. J. Lavace, J. Fortin, E. D. Crainic, "Interpretation of Resistivity Sounding Measurements in N-Layer Soil using Electrostatic Images", Jul 96 (006-7), T-PWRD
- [73] S. T. Sobral, J. O. Barbosa and V. S. Costa: "Ground potential rise characteristics of urban step-down substations fed by power cables - a practical example". IEEE Summer Meeting, No. SM 1987, pp. 526-527.
- [74] El-Kady, M. A., P. W. Hotte, M. Y. Vainberg, "Probabilistic Assessment of Step and Touch Potentials Near Transmission Line Structures", IEEE, Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS. 102, No. 3, March, 1983, pp. 640-645.
- [75] G. Papagiannis, D. Tsiamitros, D. Labridis, P. Dokopoulos, "Influence of Earth Stratification on Overhead Power Transmission Line Impedances. A Finite Element Approach", (Athens) MED02/086, November 2002.
- [76] Збирка техничких препорука ТП-1 до ТП-15 ЕПС, најновије издање, март 2001.
- [77] Техничка препорука ТП-23, УДРУЖЕНА ЕЛЕКТРОПРИВРЕДА-БЕОГРАД, 1982 г.
- [78] Правилник за технички нормативи за градба на надземни електроенергетски водови со номинален напон од 1 kV до 400 kV (Сл. лист на СФРЈ бр.65/1988).
- [79] Техничка препорука 9, Електропривреде Србије, за izvoђewe уземљења и уземљивача стубова надземних електроенергетских водова номиналног напона 1, 10, 20, 35 и 110 kV.
- [80] Збирка електротехничких прописа - V измењено и допуњено издање, Службени лист на СФРЈ 1979г.
- [81] С. Минић, М. Јемуовић, З. Костић, М. Котуревић, "Заштитно уземљење ТС СН/НН- пракса, прописи и предлози за преиспитивање", ЈУКО ЦИРЕД, 1 Саветовање, Златибор, 5-8 октомври 1998, I 1-39.
- [82] J. Nahman, "Uzemljenje neutralne tačke distributivnih mreža", Naucna kniga, Beograd 1980.
- [83] J. Nahman, "Programi EFD-1 i EFD-2 za proračun uzemljivačkih sistema u dvoslojnom i homogenom tlu", XIII Savjetovanje, JUNAKO CIGRE, Bled 1977.
- [84] J. Nahman, "Numerički postupak za proračun medjusobnih otpornosti tankih pravoliniskih provodnika", ELEKTROTEHNIKA, ELTHB2, 27 Zagreb, Maj - Juni 1984, pp.27-32.
- [85] J.M.Nahman, 'Earthing effects of coated underground cables with metallic shields bonded to earth electrodes', IEE, January 1997.
- [86] J. Nahman, V. Djordjevic, "Earth fault currents and potentials distribution in composite systems", IEE Proc.-Gener. Transm. Distrib., Vol. 142, No. 2, March 1995, pp. 135-142.
- [87] J. Нахман, Н. Мијушковић, Д. Станковић, "Утицај дугих проводника у тлу на карактеристике мрежастих уземљивача", XIII Савјетовање, Блед, 17-22 април, 1977, стр. 111-122.

- [88] J. Нахман, Д. Јеловац, "Анализа међусобног утицаја уземљивача", XIII Савјетовање, Блед, 17-22 април, 1977, стр. 93-109.
- [89] J. Нахман, В. Борђевић, "Расподела струја земјоспоја и потенцијала у сложеним уземљивачким системима", ЈУКО ЦИГРЕ, 22 Саветовање, Врњачка Бања, 21-25 мај 1995, Р 23-12.
- [90] J. Нахман, Д. Саламон, "Рачунарска интерпретација резултата мерења специфичне електричне отпорности тла Венеровом методом", ЈУКО ЦИГРЕ, 21 Саветовање, Врњачка Бања, 11-14 октомври 1993, Р 23-10.
- [91] J. Nahman, M. Zlatanovski, "Risk of fatal electric shocks at distribution network MV/LV transformer stations", IEE Proc.-Gener. Transm. Distrib. Vol. 145, No. 4, July 1998, pp. 463-467.
- [92] Nahman, J, and D. Salamon, "Analytical expressions for the resistance of rodbeds and of combined grounding systems in nonuniform soil", (86 WM 126-7); T-PWRD Jul 86 pp.90-96.
- [93] Nahman, J.M, "Assessment of the risk of fatal electric shocks inside a substation and in nearby exposed areas", (89 SM 816-0), T-PWRD Oct 90, pp. 1794-1801.
- [94] Nahman, J and D. Salamon, "Effects of the metal sheathed cables upon the performances of the distribution substations grounding system", (91 WM 035-6), T-PWRD Jul 92, pp. 1179-1187.
- [95] J.M.Nahman, V.B.Djordjevic, "Nonuniformity Correction Factors for Maximum Mesh-and Step-Voltages of Ground Grids and combined Ground Electrodes". Jul 95 (WM 003-4), T-PWRD.
- [96] J.M.Nahman, V.B.Djordjevic, D.D.Salamon, "Grounding Effects of HV and MV Underground Cables Associated With Urban Distribution Substations "IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 17, No.1, January 2002, pp 111-116.
- [97] J.M.Nahman, V.B.Djordjevic, D.D.Salamon, "Nonuniformity Correction Factors for Maximum Mesh-Voltages of Combined Grid-Multiple Rods Electrodes", Jul 96 (WM 005-9), T-PWRD.
- [98] J.M.Nahman, V.B.Djordjevic, "Resistance to ground of combined grid-multiple rods electrodes", January 96 (WM 005-9), T-PWRD.
- [99] Nahman, J.M, Assessment of the Risk of Fatal Electric Shocks Inside a Substation and in Nearby Exposed Areas, (89 SM 816-0), T-PWRD Oct 90, pp. 1794-1801.
- [100] J. Нахман, В. Мијаиловић, "Високонпонска постројења", ЕТФ Београд, 2000. - книга.
- [101] J. Нахман, "Одбрана поглавја из разводних постројења", "Академска мисао", Београд, 2002 г. Книга.
- [102] Lj. Popovic, " Practical method for evaluating ground fault current distribution in station, towers and ground wire", IEEE/PES Winter Meeting, January 21-25, 1996.
- [103] D. Jelovac, "Matematički modeli za analizu uslova uzemljenja TS 10/0.4 kV", ELEKTROTEHNIKA, ELTHB2, 29, Zagreb, Maj - Juni 1986, pp.149-154.
- [104] Medić, "Uz proračun medjusobnog djelovanja uzemljivača", ELEKTROTEHNIKA, ELTHB 2, 29, Zagreb, Maj - Juni 1986, pp.93-98.
- [105] Zelić, I. Medić, "Analiza utjecaja uzemljivača ograde postrojenja na raspodjelu potencijala u okolnom tlu", ELEKTRO-TEHNIKA, ELTHB2,29, Zagreb, Maj - Juni 1986, pp.79-83.

- [106] Galek, "Analiza dodirnog napona i načina uzemljenja ograde elektroenergetskog postrojenja", ELEKTROTEHNIKA, ELTHB2,27, Zagreb, 1984, pp.105-108.
- [107] S. Milun, "Geoelektrično sondiranje izmjeničnom strujom: utjecajne velicine", ELEKTROTEHNIKA, ELTHB2,27, Zagreb, 1984, pp.127-132.
- [108] S. Milun, "Obrada rezultata geoelektričnog sondiranja nehomogenog tla", ELEKTROTEHNIKA, ELTHB2,27, Zagreb, 1984, pp.133-138.
- [109] Pavić, "Mjerenje otpora uzemljenja mosnom metodom", ELEKTROTEHNIKA, ELTHB2, 27, Zagreb, 1984, pp.139-143.
- [110] Љ. Герић, "Карактеристике прстенастих уземљивача", XIII Савјетовање, Блед, април 1977, ст. 93-110.
- [111] В. Стевановић, "Редукциони фактор 10 kV кабла РР 41-прорачун и лабораторијска мерења", ЈУКО ЦИГРЕ, 23 Савјетовање, Херцег Нови, 25-30 мај 1997, Р 21-09.
- [112] Т. Бојковић, Д. Станковић, "Коришћење металног плашта кабла као уземљивача и проблем изношења потенцијала из постројења 110 kV са директном трансформацијом", XIII Савјетовање, Блед, 17-22 април, 1977, стр. 139-155.
- [113] В. Ђорђевић, "Расподела струја у систему уземљења код блиских кварова на далеководима уз уважавање ефекта близине", ЈУКО ЦИГРЕ, 21 Саветовање, Врњачка Бања, 11-14 октобар 1993, Р 23-09/2.
- [114] Љ. Поповић, "Практична метода за анализу сложених уземљивачких система на примеру ТС 110/10 kV "ОБИЛИ""", ЈУКО ЦИГРЕ, 24 Саветовање, Врњачка Бања, 17-20 октомври 1999, Р 23-07.
- [115] В. Стрезоски, Г. Швенда, "Расподела потенцијала и струје квара при земљоспојевима на надземним водовима-методологија", ЈУКО ЦИГРЕ, 22 Саветовање, Врњачка Бања, 21-25 мај 1995, Р 23-16.
- [116] Г. Швенда, В. Стрезоски, "Расподела потенцијала и струје квара при земљоспојевима на надземним водовима-прорачуни", ЈУКО ЦИГРЕ, 22 Саветовање, Врњачка Бања, 21-25 мај 1995, Р 23-17.
- [117] Љ. Поповић, "Расподела струје земљоспоја у ТС 110/X kV напајаној водом који није на целој дужини хомоген", ЈУКО ЦИГРЕ, 22 Саветовање, Врњачка Бања, 21-25 мај 1995, Р 23-15.
- [118] Љ. Поповић, "Практична метода за одредјивање расподеле струје земљоспоја на надземном воду", ЈУКО ЦИГРЕ, 23 Савјетовање, Херцег Нови, 25-30 мај 97, Р 23-06.
- [119] В. Балковој, "О ефектима полагања линијских уземљивача у истом рову са 20 kV полиетиленским кабловима", ЕЛЕКТРОПРИВРЕДА бр.4, 1998, стр. 12-22.
- [120] Kostic, Miomir.B., and Gholam Hossein Shirkoohi, "Numerical analysis of a class of foundation grounding systems surrounded by two-layer soil", (92 SM 387-1), T-PWRD Jul 93, pp. 1080-1087.
- [121] Kostic,M.B, "Parametric analysis of foundation grounding systems surrounded by two-layer soil", T-PWRD Jul 94, pp. 1406-1411.
- [122] L. M. Popovic, "Practical Method for Evaluating Ground Fault Current Distribution in Station Supplied by an Unhomogeneous Line", Apr 97 (96 T&D), T-PWRD.

- [123] Leonid. D. Grcev, "Computer Analysis of Transient Voltages in Large Grounding Systems", Apr 96 (95 SM 363-2), T-PWRD.
- [124] Златаноски, М., Ачковски, Р., Ацевски, Н., "Испитување на критериумите за безбедност кај типски ТС СН/НН според постојните прописи и поновите препораки", Трето советување, МАКО-ЦИГРЕ, Охрид, 2001.
- [125] Златаноски, М., "Ризик од несреќи во разводните постројки за висок напон", докторска дисертација, Скопје, 1991 год.
- [126] Zlatanovski, M., "Ocena verovatnoce izlozenosti na opasnost u okolini visokonaponskih postrojenja", JUKO CIGRE, XX Savjetovanje, Neum, 22-26 April, 1991.
- [127] Б. Ханџиски, П. Врангалов, В. Димчев, В. Ханџиски, "Студија за работата на СН мрежа во Велес во услови на заземјена неутрална точка на 10 kV страна".
- [128] B. Handziski, P. Vrangalov, V. Handziski, V. Dimcev, "An Improved Study of the Schlumberger Method for Soil Resistivity Measurements", (Athens) MED02/262, November 2002.
- [129] Ackovski, R., Rajicic, D., "New Method for Tower Potentials and Ground Wire Current Computation", Int.Conf. "Modeling and Simulation", Scotsdale, Arizona, March 1988.
- [130] Р. Ачковски, "Проектирање на заземјувачи со помош на персонални компјутери", Семинар за електроинженери, Охрид 1991.
- [131] Р. Ачковски, "Надземни водови - елементи на заземјувачкиот систем на ЕЕС", Семинар за електроинженери, Охрид 1997.
- [132] D. Rajicic, R. Ackovski, R. Taleski, "Voltage Correction Power Flow, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 9, No. 2, pp. 1056-1062, April, 1994
- [133] R. Taleski, D. Rajicic, "Noniterative Power Flow Method for Radial and Weakly Meshed Distribution Networks, september 1995, Ohrid, Republic of Macedonia.
- [134] Д. Рајичиќ, Р. Талески, "Метод за анализа на заземјувачки системи" Зборник на трудови, ЕТФ-Скопје, год 16/17, бр. 1-2. 31-32 (1993/1994).
- [135] D. Rajicic, R. Taleski, "Radial Distribution Systems Short Circuit Analysis Using Admittance Summation Method", Proceedings, Department of Electrical Engineering-Skopje, Vol. 19. No. 1-2, pp-11-14, 1996.
- [136] Н. Ацевски, "Анализа на приликите во заземјувачкиот систем на СН електроенергетски мрежи при појава на куси врски со земја", Магистерски труд, Скопје, февруари 1996.
- [137] Н. Ацевски, Р. Ачковски, "Пресметка на приликите во заземјувачките системи на среднонапонските дистрибутивни мрежи при појава на земен спој односно куса врска", I Советување на МАКО СИГРЕ, , Струга, септември, 1996 г, стр. 44-52.
- [138] Н. Ацевски, Ј. Шикоски, "Решавање на галвански одвоени заземјувачи и заземјувачки системи", I Советување на ЕСМ, Битола, 16-18 декември 1999г., стр. 166-169.
- [139] N. Acevski, R. Ackovski, J. Shikoski, "Model for calculating the conductivity to ground of power cables with metallic shield placed on a two layer soil", International Conference on Electrical and Electronics Engineering-ELECO'99, Bursa, Turkey, Dec.1999, E02.27/A6-16 pp.76-79.

- [140] Н. Ацевски, Р. Ачковски, "Извоз на потенцијали во металните инсталации и заземјувачи на станбени објекти", I Советување на ЕСМ Битола, 16-18 декември 1999 г., стр. 170-173.
- [141] Р. Ачковски, Н. Ацевски, "Влијание на формата и димензиите на работниот заземјувач кај ТС СН/НН врз неговата отпорност на распростирање", I Советување на ЕСМ, Битола, 16-18 декември 1999 г., стр. 174-177.
- [142] Н. Ацевски, Р. Ачковски, "Анализа на еквивалентната отпорност на распростирање на повеќе енергетски кабли поставени во заеднички ров", I Советување на ЕСМ, Битола, 16-18 декември 1999 г., стр. 252-255.
- [143] N. Acevski, R. Ackovski, "Determining of galvanically separated grounding grids and grounding systems", MELECON'2000, 10th Mediterranean Electrotechnical Conference May 29-31 CYPRUS, IEEE Region 8. No, MEL0316.
- [144] N. Acevski, R. Ackovski, "Computer method for analysis of complex grounding grids in homogeneous and unhomogeneous environment", KEKS'2000, XXXV Naucna sesija "Komunikaciski, Elektronski i Kompjuterski sistemi 2000", Sofija, 18-19 maj 2000g.
- [145] R. Ackovski, N. Acevski, "Computer methods or practical relations for calculation of transfered potential in grounding-grids in residential buildings", KEKS'2000, XXXV Naucna sesija "Komunikaciski, Elektronski i Kompjuterski sistemi 2000", Sofija, 18-19 maj 2000g.
- [146] N. Acevski, R. Ackovski, "Influence of the Metal Instalations in the Ground on the Measurement Results Accuracy on the Soil Resistivity", JBSAEM 2-K, 15-17 September 2000, Ohrid.
- [147] R. Ackovski, N. Acevski, "Method for Analysis of Complex Grounding Cables Systems", JBSAEM 2-K, 15-17 September 2000, Ohrid.
- [148] Р. Ачковски, Н. Ацевски, "Кабли со изолација РЕ и XLPE, посматрани како елементи на заземувачките системи", XXXVI Меѓународна конференција ЕИСТ 7, 8 јуни 2001, Битола, стр.7-12.
- [149] Р. Ачковски, Н. Ацевски, "За редукиониот фактор на класичните кабли", XXXVI Меѓународна конференција ЕИСТ 7, 8 јуни 2001, Битола, стр. 13-18.
- [150] Н. Ацевски, Р. Ачковски, "Анализа на формата, димензиите и локацијата на работниот заземјувач на ТС СН/НН", XXXVI Меѓународна конференција ЕИСТ 7, 8 јуни 2001, Битола, стр. 43-48.
- [151] Н. Ацевски, Р. Ачковски, "Примена на симулацијата Монте Карло за пресметка на условите за безбедност во заземјувачките системи", XXXVI Меѓународна конференција ЕИСТ 7, 8 јуни 2001, Битола, стр. 37-42.
- [152] Р. Ачковски, Н. Ацевски, "Хибриден метод за анализа на приликите во сложени заземјувачки кабелски системи", Трето советување, МАКО-ЦИГРЕ, Охрид, 2001, R 31-01.
- [153] Н. Ацевски, Р. Ачковски, "Анализа на карактеристиките на типските форми на заземјувачи на ТС СН/НН на подрачјето на Охрид", МАКО СИГРЕ, III Советување, R 23-07.
- [154] Р. Ачковски, Н. Ацевски, "Избор на форма, димензии и локација на работен заземјувач на ТС СН/НН", Трето советување, МАКО-ЦИГРЕ, Охрид, 2001, R 23-05.

- [155] Н. Ацевски, Р. Ачковски, "Анализа на влијанието на металните инсталации во земјата врз точноста на мерењето на отпорноста на тлото", Трето советување, МАКО-ЦИГРЕ, Охрид, 2001, R 23-08.
- [156] Н. Ацевски, Р. Ачковски, "Практични релации за пресметка на извезениот потенцијал во метални инсталации и заземјувачи на станбени објекти", Трето советување, МАКО-ЦИГРЕ, Охрид, 2001, R 31-02.
- [157] Н. Ацевски, Р. Ачковски, "Анализа на начинот на заземјување на оградата на ТС", Трето советување, МАКО-ЦИГРЕ, Охрид, 2001, R 23-06.
- [158] N. Acevski, R. Ackovski "A new model and method for calculation of characteristics of grounding cables system", Annual Scientific Sesion with Internacional Participation, Technical University of Varna, 11-13 Oktomvri 2001, Varna, pp. 432-438.
- [159] М. Златаноски, Р. Ачковски, Н. Ацевски, "Прилог кон испитувањето на критериумите за безопасност кај ТС СН/НН"- Трето советување, МАКО-ЦИГРЕ, Охрид, 2001, R 23-04.
- [160] R. Ackovski, M.Zlatanovski, N. Acevski, "Analysis of the Characteristics of Grounding Elements of Towers of Overhead Lines and Safety Criteria with the Monte Carlo Simulation", (Athens) MED02/066, November 2002.
- [161] Н. Ацевски, Р. Ачковски, "Итеративен метод за анализа на сложени заземјувачки кабелски системи" -Битола, Зборник на трудови, 2002.
- [162] Програмски пакет "ЗАЗЕМ" за проектирање на сложени заземјувачи со произволна структура и геометрија. ЕТФ-Скопје, 1991 год.
- [163] Р. Ачковски, Р. Талески, А. Димитровски, Д. Рајчиќ, "Студија за развојот на на ВН мрежа на Република Македонија во периодот до 2020 година". Студија работена за потребите на Ј.П. "Електростопанство на Македонија". ЕТФ-Скопје, 2001 г.
- [164] Главен проект на заземјувањето и громобраните на ТС Скопје 1-електричен дел. ХЕП - Скопје, 1964.
- [165] Елаборат за извршеното испитување на заземјувањето, напон на допир и чекор во ТС 220/110/35 kV Скопје 1. (интерен елаборат изготвен од службата за мерење и испитување при А.Д. ЕСМ), октомври 2000 г.
- [166] Н. Ацевски, Р. Ачковски, В. Јовановска, "Ревизија на [123] Главен проект за заземјување на 400/110 kV ТС Скопје 5, (книга 2, дел 10 од Главниот проект на ТС 400/110 kV Скопје 5)", јуни 2002 г.
- [167] Р. Ачковски, Н. Ацевски, "Нови модел класичног IPO кабла – посматран као елемент уземљивачких система", 17 Меѓународни Симпозиум о кабловима, ICS' 2002, Златибор, 22-26 Септембар 2002 г, R III-14, стр. 163-170.
- [168] Р. Ачковски, Н. Ацевски, С. Томић, "Модели каблова са изолацијом PE и XLPE, посматрани као елементи уземљивачких система", 17 Меѓународни Симпозиум о кабловима, ICS' 2002, Златибор, 22-26 Септембар 2002 г, R III-15, стр. 171-175 .
- [169] Н. Ацевски, Р. Ачковски, "Современи аспекти кон постапката за проектирање на заземјувачкиот систем на ТС ВН/СН", Прв Конгрес на инженерите на Македонија, Инженерството двигател и во новиот милениум, 24-26 Октомври, 2002 г., Струга, стр. 297-302.

- [170] Љ. Арсов, Р. Ачковски, Б. Ханџиски. "Главен проекут на заземјувачкиот систем на далекуводот 400 kV Битола 2 ☐ Скопје 4" Проект изработен за потребите на Ј.П. "Електростопанство на Македонија", ЕТФ-Скопје, 1994 г.
- [171] Р. Ачковски, Р. Талески, А. Димитровски, Д. Рајичиќ. Студија за високонапонската мрежа на Република Македонија во 2002, 2010 и 2020 година. Студија работена за потребите на Ј.П. "Електростопанство на Македонија, ЕТФ-Скопје, 2000.
- [172] Magazine ELECTRA 30 years 1968-1998, complet CDs.
- [173] Р. Ачковски, Н. Ацевски, К. Наумоски, "Распределба на струите на доземен спој во заземјувачкиот систем на надземните водови", труд во ракопис.
- [174] Р. Ачковски, Н. Ацевски, К. Наумоски, "Оценка на перформансите на заземјувачкиот систем на водот 400 kV Дуброво - Штип", труд во ракопис.
- [175] Д. Рајичиќ, Р. Ачковски, "Модел на кабелски електроенергетски вод како компонента на заземјувачкиот систем", труд во ракопис.
- [176] Б. Блажев, Р. Ачковски. Главен проект за заземјување на неутралната точка во дистрибутивната 10 kV мрежа на градот Охрид приклучена на ТС 110/35/10 kV "Охрид 1" ТС 110/10 kV "Охрид 2" и ТС 35/10 kV "Лескајца", 2001 г.
- [177] D. Rajičić, R. Talevski, "Two novel methods for radial and weakly meshed network analysis", Electric Power Systems Research 48 (1998) pp. 79-87.
- [178] J. Nahman, "Proximity effects on the ground fault current distribution within the earthing system formed by a substation and the associated transmission lines", IEE Proc. C, 1988, 135, (6), pp. 497-502.