

**УНИВЕРЗИТЕТ “СВ. КИРИЛ И МЕТОДИЈ”- СКОПЈЕ
ФАКУЛТЕТ ЗА ЕЛЕКТРОТЕХНИКА
И ИНФОРМАЦИСКИ ТЕХНОЛОГИИ**



Ристо К. Ачковски

**“ЗАЗЕМЈУВАЧИ И ЗАЗЕМЈУВАЧКИ СИСТЕМИ
ВО ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТСКИТЕ МРЕЖИ“**

(второ, дополнето и проширено издание)



Скопје, септември 2008 г.

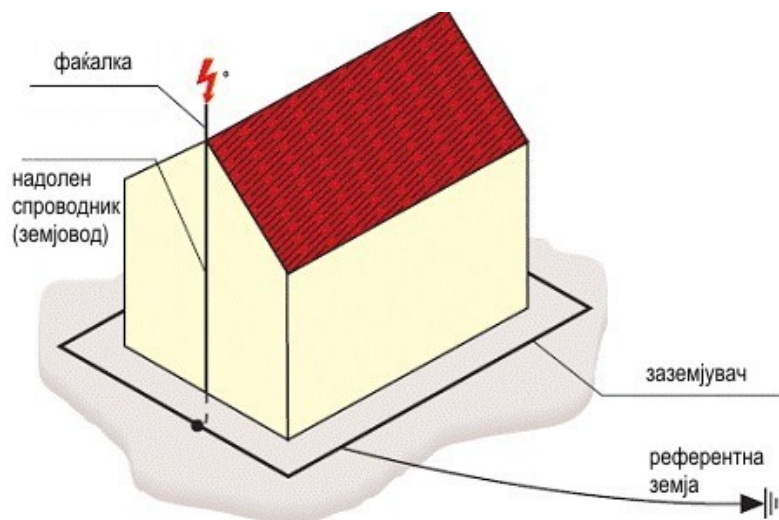
1. ОПШТО ЗА ЗАЗЕМЈУВАЧИТЕ И ЗАЗЕМЈУВАЧКИТЕ СИСТЕМИ ВО ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТСКИТЕ МРЕЖИ

1.1. ВОВЕД. ОСНОВНИ ПОИМИ. ПРЕДМЕТ И ОБЛАСТ НА ИЗУЧУВАЊЕ

Вовед. 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.

Тој комплекс мерки, исто така, треба да обезбеди и заштита на луѓето и опремата од струите и напоните што се јавуваат при атмосферските празнења.

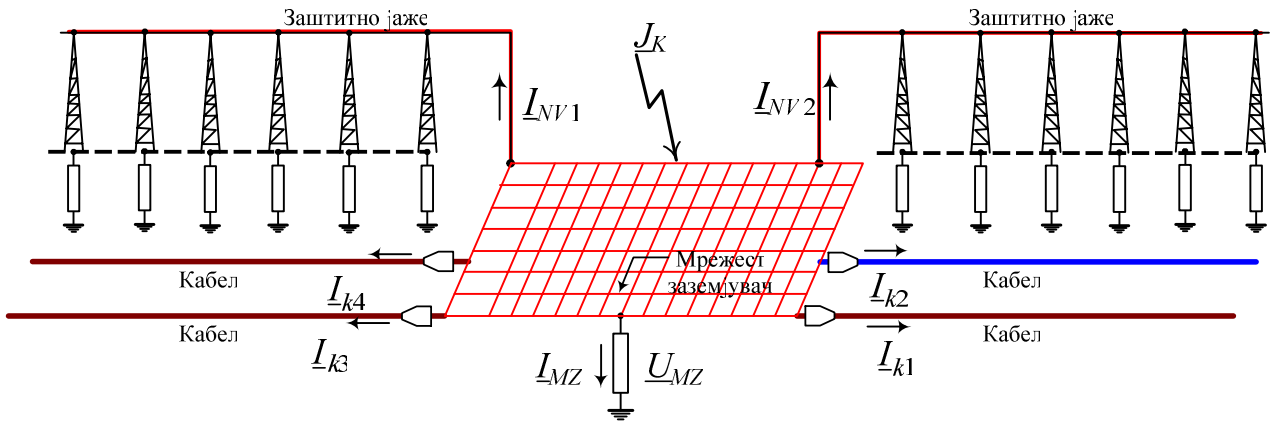


Слика 1.1. Заземјувач како елемент на една громобранска инсталација

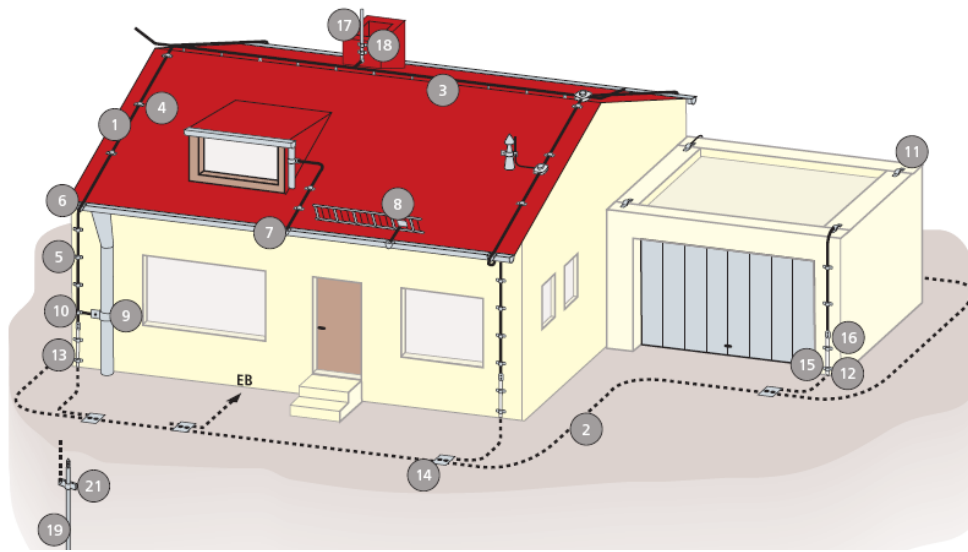
Да се заземји некој уред, апарат или објект значи спроводните делови од тој уред или објект галвански да се поврзат со заземјувачкиот систем (ЗС).

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 плото (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 загрозат животот на луѓето и животните што можат да се најдат во непосредната околина на заземјувачот.



Слика 1.2. Заземјувачки систем на една 110 kV разводна постројка



Слика 1.3. Изглед на заземјувач од еден индивидуален станбен објект

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 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 средно-напонските (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 (земјоспоеви) 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 достигнуаат 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 (НТ) преку мала активна отпорност 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. 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 сл.).

Промена на тетманот на неутралната точка (НТ) 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.

Според досегашната наша практика заземјувањето на НТ да се вршеше преку отпорник со мал активен отпор.

Според новата концепција на АД ЕСМ-ЕВН, во иднина неутралната точка на среднонапонските дистрибутивни мрежи 10, 20 и 35 kV ќе се заземјува преку Петерсенев калем (придушница).

1.3. МЕТОДОЛОГИЈА ЗА АНАЛИЗА. 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. Погolem 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 ракописов 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.

Модели 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 него-

вите 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 споменатиот софтверски алат, 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.

Модел за ЗС на надземните водови. Во учебникот се разработени и моделите за надземните водови (со и без заштитно јаже), третирали 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 безбедност. Напони на допир и чекор. За да се изврши оценка на условите за безбедност 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 $[Y]$ 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 факторизација на матрицата на адмитанции $[Y]$, бидејќи постојат усовершени алго-

ритми 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 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.

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.

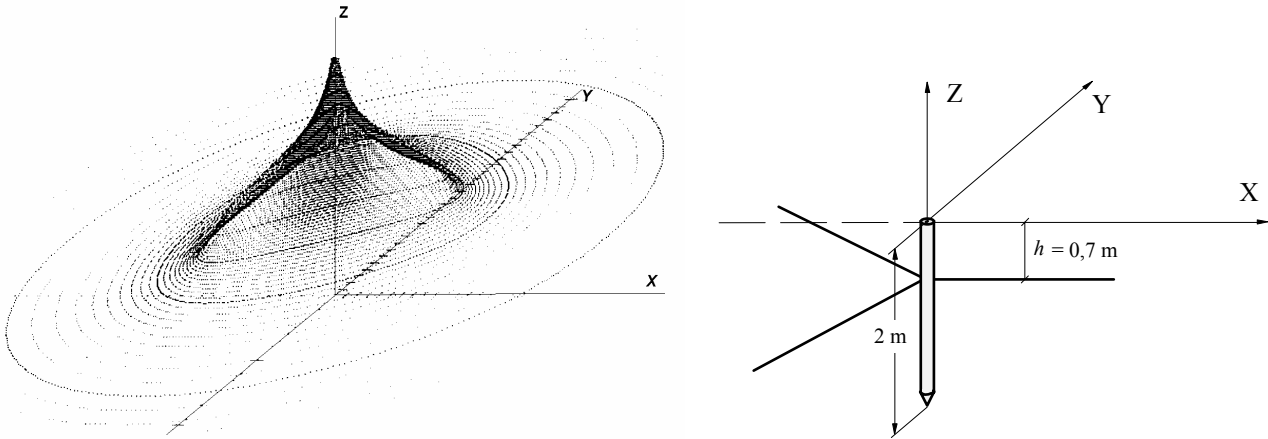
Погонското (*работно*) заземјување е заземјувањето на дел од струјното коло со што се обезбедува определена функција и/или работна карактеристика на тоа струјно коло.

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).

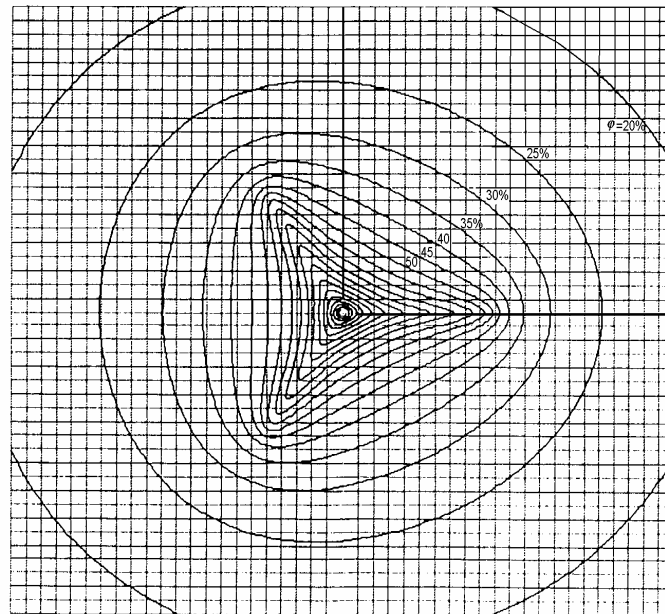
Громобранското заземјување е заземјување на громобранската инсталација и служи за одведување на струјата на атмосферското празнење во земјата. Но притоа громобранското заземјување треба да го ограничи напонот (потенцијалот) на кој што доаѓа громобранската инсталација за време на атмосферското празнење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

Карактеристични величини на заземјувачите

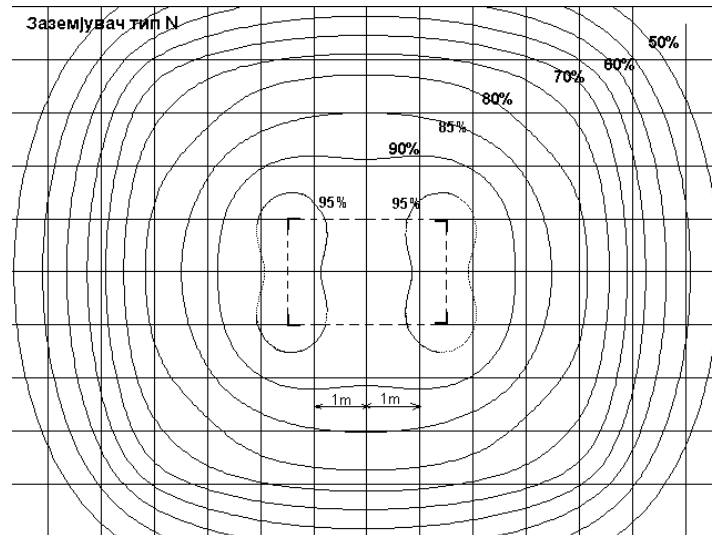
Величините што го карактеризираат еден заземјувач се дефинираат преку струјата I_Z што се одведува од заземјувачот во земјата и преку сликата на потенцијалното поле $\varphi(x,y)$ кое, како последица на одведувањето на струјата I_Z во земјата, се јавува во тлото и на површината од земјата. Сите потенцијали 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 $\varphi_0 = 0$.



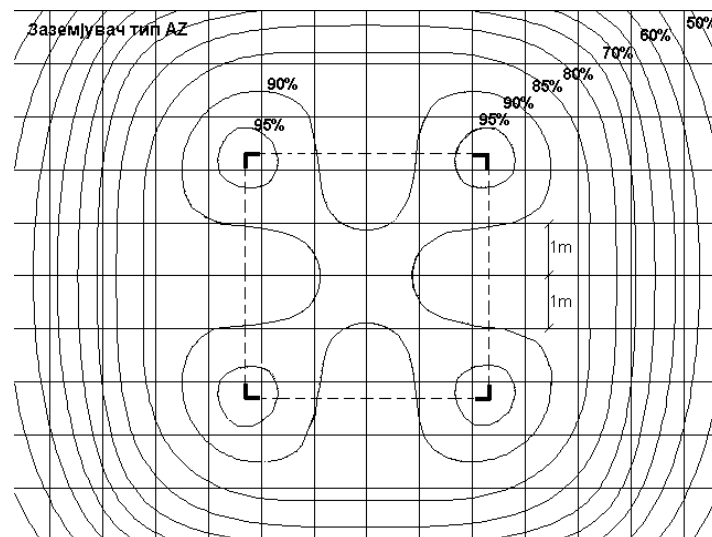
Слика 1.а Потенцијална инка во околината на заземјувач составен од три хоризонтални краци и една вертикална сонда



Слика 1.4.6. Приказ на еквипотенцијалните линии во околината на заземјувачот од сл. 1.1.а.



Слика 1.4.в. Приказ на еквипотенцијалните линии по површината од земјата во околината на заземјувач од еден 110 kV носечки столб.



Слика 1.4.г. Приказ на еквипотенцијалните линии по површината од земјата во околината на заземјувач на еден 110 kV аголно-затезен (AZ) 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) 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.

$$U_Z = \varphi_Z - \varphi_0. \quad (1.1)$$

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 распространување на заземјувачот R_Z претставува единствената карактеристична величина на заземјувачот која што зависи исклучиво од конструктивните карактеристики 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.

$$R_z = \frac{\varphi_z}{I_z} = \frac{U_z}{I_z}. \quad (1.2)$$

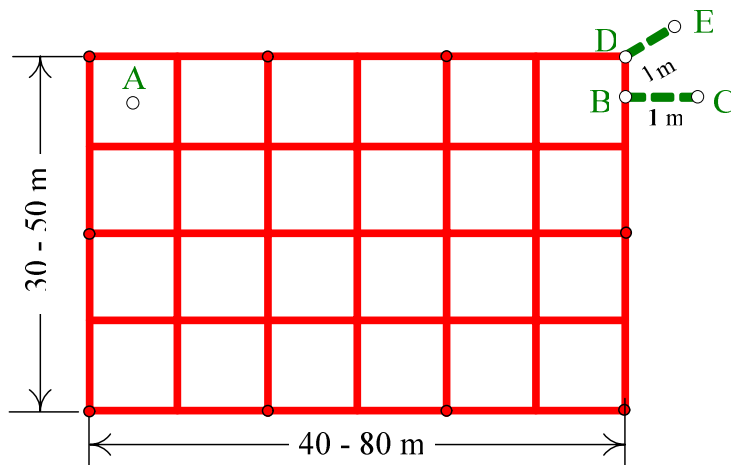
Покрај овие две величини во натамошниот дел од текстот ќе се среќаваме и со поимот “импеданција на заземјување” Z_z . Тоа е импеданцијата со која посматраниот заземјувачки систем се спротивставува на одведувањето на струјата кон референтната земја. Таа се пресметува како паралелна врска на отпорноста 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 ЗС. 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_r 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:

$$E_d = U_z - \varphi_r. \quad (1.3)$$

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



Слика 1.5. Изглед на мрежест заземјувач од една 110 kV постројка.

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 $\varphi_z = U_z$.

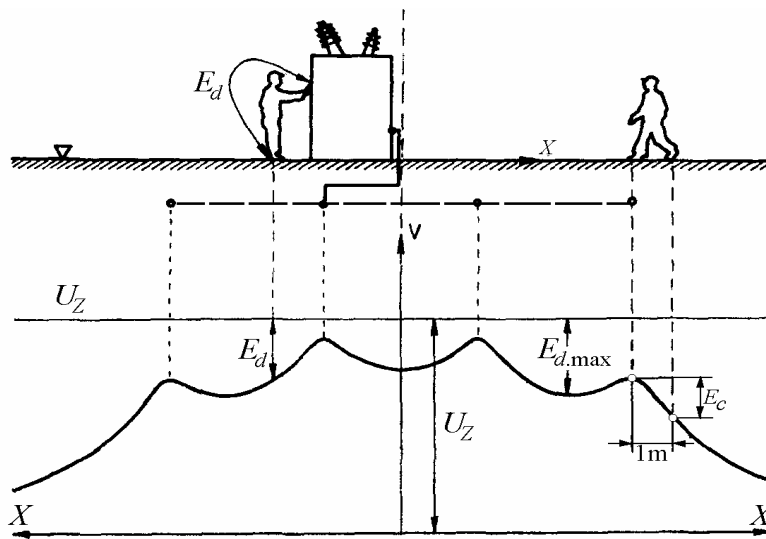
Заземјувачите во разводните постројки или во трансформаторските станици најчесто се изведуваат во форма на хоризонтална мрежа закопана на длабочина $0,7 \div 1$ m под површината на земјата (слика 1.5).

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 (1.4), како максимална вредност на потенцијалната разлика на допир за целата област над заземјувачот:

$$E_{d,max} = U_z - \varphi_{T,min}, \quad (1.4)$$

Во релацијата (1.4) 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 $E_{d,max}$. 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.

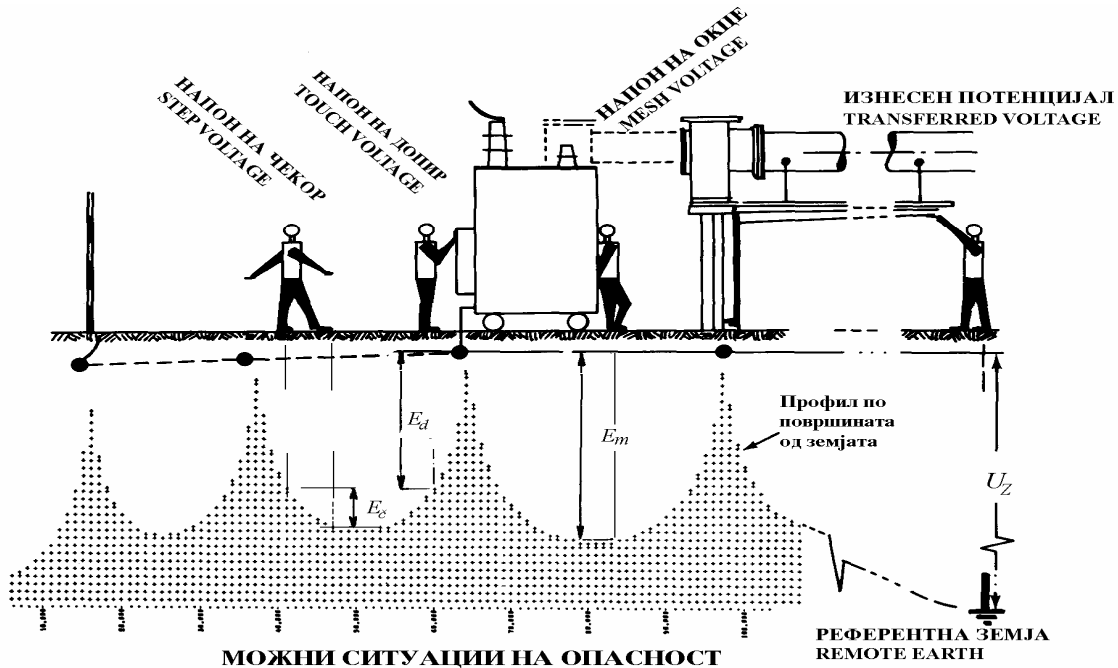


Слика 1.6.a. Распределба на потенцијалите над мрежест заземјувач

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 1.6.a е прикажана скицата од еден мрежест заземјувач и распределбата на потенцијалите по површината од земјата по должината на правецот што го преполовува крајното, ивично, 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. Потенцијална разлика на допир E_{d-max} 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.



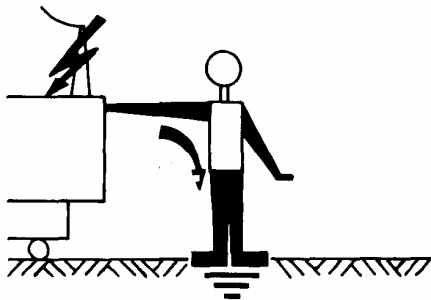
Слика 1.6.6. Можни ситуации на опасност и некои дефиниции на потенцијалните разлики

На сликата 1.6.6 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.

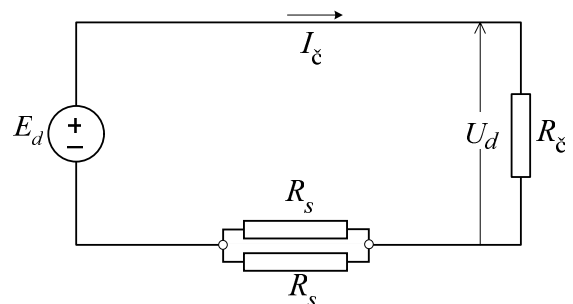
Вистинскиот напон на кој што се изложува човекот при допир, U_d , е секогаш помал од потенцијалната разлика E_d за падот на напон на преодната отпорност R_s тло – стопало поради ограничената површина на самиот контакт. Ако човечкото стопало се замисли дека претставува кружна плоча со еквивалентен пречник $D_s \sim 0,16$ m, тогаш преодната отпорност R_s на стопалото приближно ќе биде:

$$R_s = \frac{\rho_p}{2 \cdot D_s} \approx 3 \cdot \rho_p \quad (1.5)$$

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



Слика 1.7. а) Потенцијална разлика на допир



Слика 1.7. б) Еквивалентна шема при допир

За допир како на сликата 1.7, 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.:

$$R_{pr} = \frac{R_s}{2} = 1,5 \cdot \rho_p, \quad (1.6)$$

па во согласност со шемата од сликата 1.7.б, напонот U_d на кој што ќе биде изложено човековото тело ќе изнесува:

$$U_d = \frac{R_{\sim}}{R_{\sim} + R_d} \cdot E_d = \frac{R_{\sim}}{R_{\sim} + R_s/2} \cdot E_d, \text{ или}$$

$$U_d = \frac{E_d}{s_d}, \quad (1.7)$$

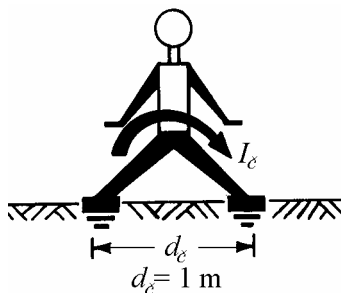
каде што факторот s_d се пресметува со релацијата:

$$s_d = 1 + \frac{R_s}{2R_{\sim}}. \quad (1.8)$$

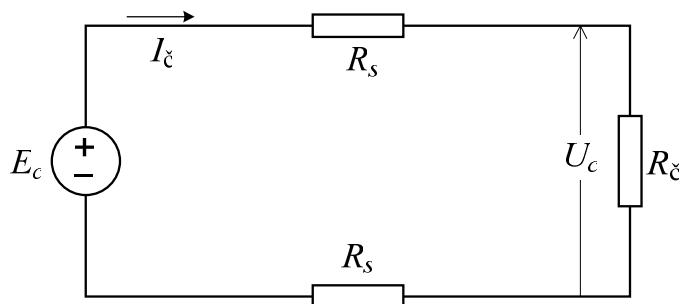
Во релациите (1.7) и (1.8) со R_{ξ} е означен отпорот на човечкото тело на патеката нозе – рака. Вредноста на отпорот R_{ξ} не е константна. Таа е нелинеарна и зависи од струјата, односно напонот на којшто е изложен човекот, но зависи исто така и од состојбата со влажноста на површината од кожата во 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_{ξ} 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 $R_{\xi} = 1000 \Omega$, 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_{ξ} 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_{ξ} усвоиме $R_{\xi} = 1000 \Omega$, тогаш, со оглед на (1.7) и (1.8) се добива:

$$s_d \approx 1 + 1,5 \cdot \rho_p \cdot 10^{-3} = 1 + 0,0015 \cdot \rho_p. \quad (1.9)$$



Слика 1.8. а) Потенцијална разлика на чекор



Слика 1.8. б) Еквивалентна шема при чекор

Напонот U_c што ќе се воспостави помеѓу стопалата на човекот кога тој со својот чекор ја премости потенцијалната разлика E_c , во согласност со шемата од сликата 1.8.б, се пресметува со помош на изразот:

$$U_c = \frac{R_{\xi}}{R_{\xi} + R_s} = \frac{R_{\xi}}{R_{\xi} + 2 \cdot R_s} \cdot E_c = \frac{E_c}{s_c}, \quad (1.10)$$

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

$$s_c = 1 + 2 \frac{R_s}{R_{\xi}}. \quad (1.11)$$

Ако се земе предвид релацијата (1.5), за $R_{\xi} = 1000 \Omega$ изразот (1.11) го добива следниот облик:

$$s_c = 1 + 6 \cdot \rho_p \cdot 10^{-3} = 1 + 0,006 \cdot \rho_p. \quad (1.12)$$

1.5. ЕЛЕКТРИЧЕН УДАР И ЕФЕКТИ ОД СТРУЈАТА НА УДАРОТ

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.

Електричен удар. 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.

Последици Последиците од електричниот удар зависат од ефективната вредност на струјата што минува низ човечкото тело I_{ξ} 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 1.3.

Табела 1.3. Дејство на струјата на ударот врз човекот

I_{ξ} (mA)	Дејство на струјата
до 1 mA	Не се чувствува.
1 – 9	Благи безболни реакции. Можна е управувана контракција на мускулите и отпуштање на делот под напон.
10 – 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 – 50	Се чувствуваат големи болки и настапува силна контракција на мускулите. Дишењето е отежнато.
50 – 100	Доколку се работи за трајно дејство, можна е и вентрикуларна фибрилација на срцето.
100 – 500	Вентрикуларната фибрилација е мошне веројатна.
> 500	Настануваат изгорници на местото на допирот. Настапува општ мускулен тонус којшто ја спречува појавата на фибрилација.

Од табелата 1.3. 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, или т.н. “let go – current” 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 *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.

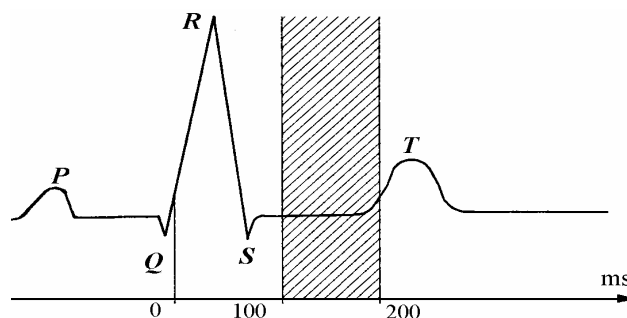
Ако струјата на ударот се движи во границите од 50 до 500 mA обично доаѓа до ацилично неконтролирано треперење на залистоците од срцето – појава наречена “*вентрикуларна фибрилација*”. Таа доведува до блокирање на работата на срцето и прекин на циркулацијата на крвта во неговото тело. Бидејќи виталните 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.

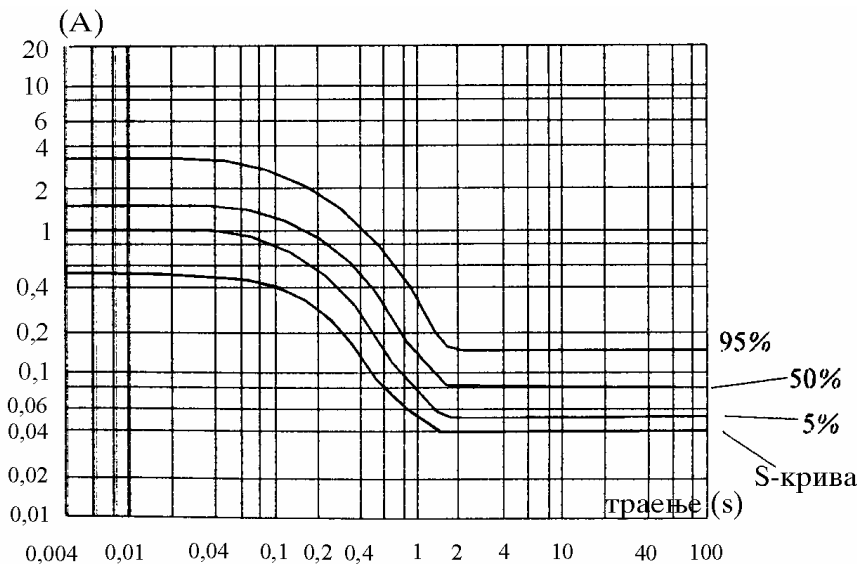
Но сепак, на лицето што претрпело електричен удар треба во секој случај да му се два вештачко дишење сè до доаѓањето на медицинскиот персонал бидејќи никогаш однапред не може да се знае исходот од дејството на струјата врз погоденото лице.

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 мртвци 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 1.9. Дијаграм на работата на срцето и критична фаза на срцевиот циклус



Слика 1.10. Зависност на нивото на ризик од големината и траењето на струјниот удар

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 1.9) 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.

Ризик според ИЕС

На сликата 1.10 се прикажани четири криви кои ја прикажуваат 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.

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

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:

$$W = \int_0^t i^2(t) \cdot dt. \quad (1.13)$$

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 електричниот удар:

$$I_{\text{doz}} = \frac{K}{\sqrt{t}}; 0,03 \text{ s} \leq t \leq 3 \text{ s}, \quad (1.14)$$

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 $K = 157 \text{ mA}$. Американските, руските па и нашите национални прописи базираат на овој модел.

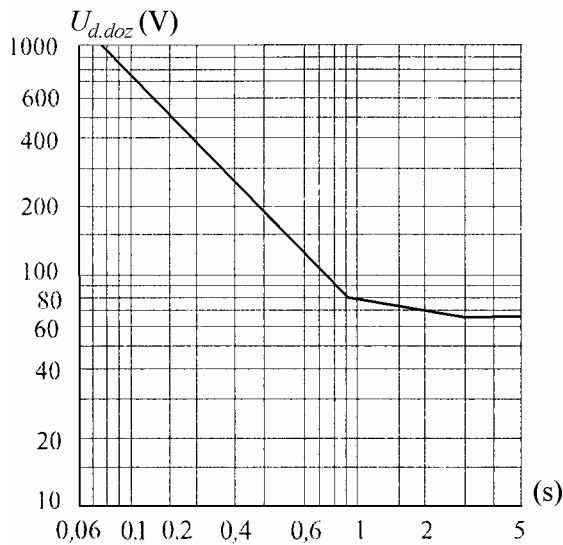
Но други научници, на база на понови сознанија и поинакво тумачење на експерименталните резултати сметаат дека место ослободената топлина, меродавно за опасноста од електричниот удар треба да биде количеството електрицитет што ќе помине низ човековото тело место, според релацијата (1.15):

$$Q = \int_0^t i(t) \cdot dt, \quad (1.15)$$

$$U_{d.\text{doz}} = U_{c.\text{doz}} = \frac{75}{t} \text{ (V)}. \quad (1.16)$$

Кривите од сликата 1.6 во најголемиот интервал од $0,04$ до 2 s многу добро се совпаѓаат со овој критериум. Германските VDE препораки (слика 1.11), швајцарските прописи, како и прописите на други земји европски исто така се базирани на примената на критериумот (1.15).

И прописите на Србија, како и германските, се темелат на примената на критериумот (1.15). Според овие прописи критериумот за дозволени напони на допир и чекор е ист и го има обликот (1.16). Притоа дозволениот напон не може да биде помал од 65 V ниту пак поголем од 1000 V , т.е. $U_{d.\text{doz}} = U_{c.\text{doz}} = 65 \text{ V}$ за $t \geq 1,153 \text{ s}$.



Слика 1.11. Дозволени напони на допир според VDE 0141

Кривите од сл. 1.10, предложени од меѓународната електротехничка комисија ИЕС, тргнуваат од претпоставката дека големината струјата I_F која предизвикува вентрикуларна фибрилација претставува случајна величина која подлежи на логонормалниот закон на распределба:

$$\log I_F = \log I_{F50} + 0,18 \cdot N(0, 1). \quad (1.17)$$

или

$$I_F = I_{F50} \cdot 10^{0,18 \cdot R_N}. \quad (1.18)$$

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

Притоа како што се гледа од дијаграмот на сл. 1.10, 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:

$$\begin{aligned} &1,6 \text{ A} && t \leq 0,1 \text{ s}; \\ I_{F50} = &0,16/t && 0,1 \text{ s} \leq t \leq 2 \text{ s}; \\ &0,08 \text{ A} && t > 2 \text{ s}. \end{aligned} \quad (1.19)$$

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

$$F(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot \int_{-\infty}^x e^{-\frac{t^2}{2}} \cdot dt; \quad (1.20)$$

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:

$$x = \frac{1}{0,18} \cdot \log \frac{I}{I_{F50}}. \quad (1.21)$$

Бидејќи интегралот (1.20) не е решлив во затворена форма, определувањето на вредноста на функцијата $F(x)$ обично се врши со примена на готови табели како што се табелите П.1.1 и П.1.2 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 $U_f = U_n/\sqrt{3} = 400/\sqrt{3} = 231$ V. Да се оцени 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 $t = 0,25$ s. Колкав би бил ризикот ако уредот се штити со несоодветно избран (калемен) осигурувач кој ќе прегори за време $t = 1$ s. За вредноста на отпорноста на човековото тело во пресметките да се усвои вредноста $R_{\xi} = 1000$ Ω .

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 (1.19) ќе ја пресметаме 50% вредност на струјата која одговара на времето на исклучување $t = 0,25$ s:

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

Понатаму со помош на релацијата (1.21) ја пресметуваме величината x што одговара на овие две струи:

$$x = \frac{1}{0,18} \cdot \log \frac{I_{\xi}}{I_{F50}} = \frac{1}{0,18} \cdot \log \frac{0,231}{0,640} = -2,46.$$

Бидејќи во табелата П.1.1 се дадени податоци само за позитивните вредности на x , најнапред ќе ја пресметаме вредноста $F(-x) = F(2,5)$. 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:

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

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

Понатаму, врз основа на релацијата:

$$F(-x) = 1 - F(x),$$

ќе ја добиеме вредноста $F(-2,46)$:

$$F(-2,46) = 1 - F(2,46) = 1 - 0,993 = 0,007,$$

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

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 $t = 1$ 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.



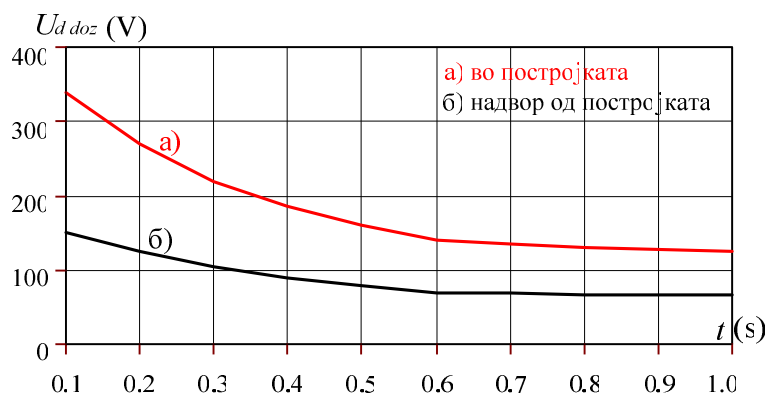
Осврт кон постојните прописи кај нас и во светот

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

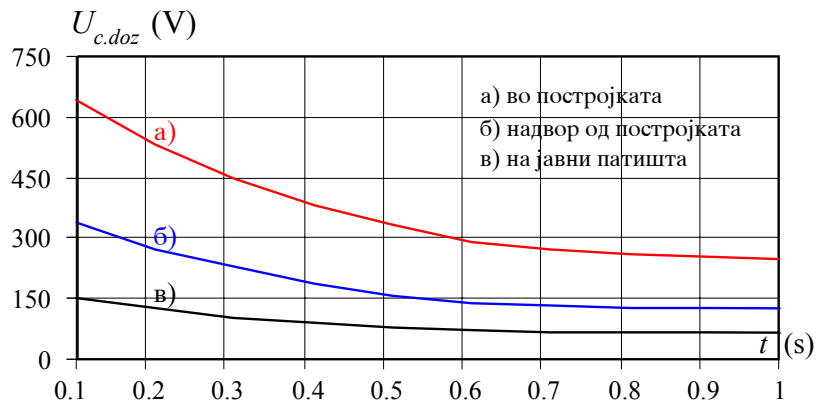
$$U_d \leq U_{d,doz} \tag{1.22}$$

$$U_c \leq U_{c,doz} \tag{1.23}$$

На сликите 1.12 и 1.13 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 30 години и се базирани на моделот којшто одговара на релацијата (1.19). 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 1.12. Зависност на дозволниот напон на допир од времето на исклучување на делот под напон, а) во постројката ако се носи изолациона облека; б) надвор од постројката



Слика 1.13. Зависност на дозволеният напон на чекор од времето на исклучување на делот под напон: а) во постројка ако се носи изолациона облека; б) надвор од постројка; в) на јавни патишта

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.

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 коеф. од (1.19), $K=157 \text{ mA}$, со уважување на низа неповолни околности, така што во нив постои значителна резерва на сигурност.

Кривите на слика 1.12 се нормирани така што да не дозволат не само фибрилација, 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 повтрно вклучување (АПВ) овие криви, очигледно, се премногу ригорозни.

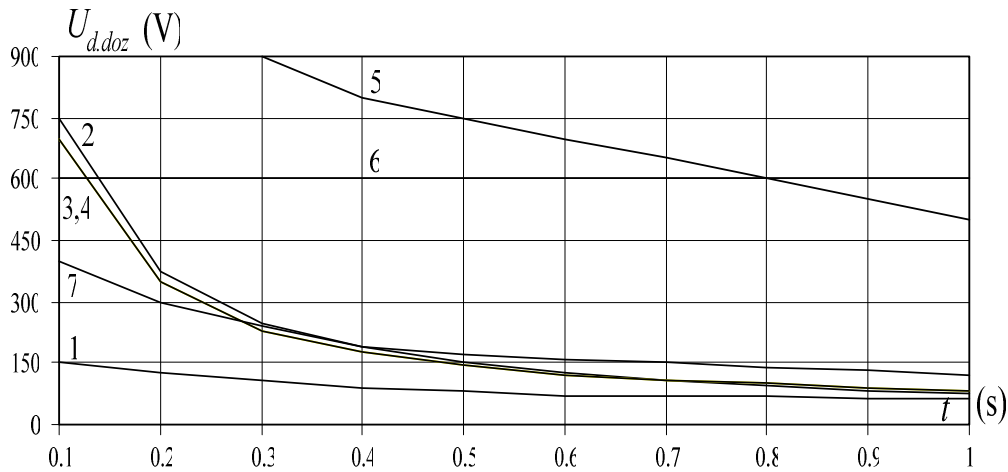
Прописи и препораки кај некои од поразвиените земји во светот

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 (1.19), 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 $R_{\zeta} = 3000 \Omega$. а интересно високите вредности во (табелата 1.4) 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 $R_{\zeta} = 3000 \Omega$. 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 сл. 1.14. Споредбена анализа на овие приписи во разни земји од светот е направена во табела 1.4.



Слика 1.14. Прописи и препораки за дозволен напон на допир во зависност од времето на исклучување на делот под напон, кај нас и во светот:

1-постојни прописи во Р. Македонија, 2-препораки во Србија, 3-нови VDE препораки, 4-прописи во Швајцарија, 5-прописи во Финска, 6-прописи во Шведска, 7-IEEE препораки

Табела 1.4. Најголеми дозволени вредности на напонот на допир (V) во разни држави во зависност од времетраењето на делот на исклучување под напон

Држава	0,1 s	0,2 s	0,3 s	0,4 s	0,5 s	0,6 s	1 s
Р. Македонија	150	125	105	90	80	70	65
Р. Србија	750	375	250	187	150	125	75
VDE препораки	700	350	230	176	145	120	80
Швајцарија	700	350	230	176	145	120	80
Финска	1600	1100	900	800	750	700	500
Шведска	600	600	600	600	600	600	600
IEEE препораки	400	300	240	190	170	160	120

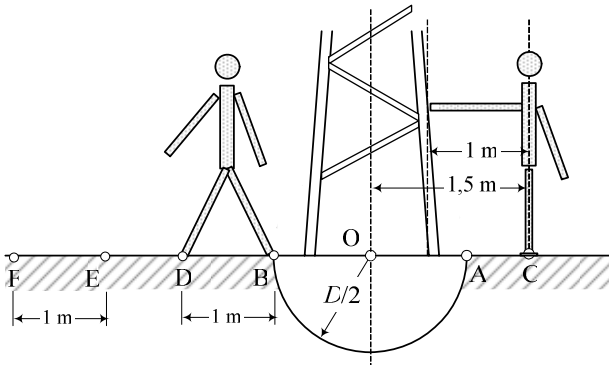
Споредувајќи ги постојните прописи во Р. Македонија со прописите во другите земји, кои се многу полиберални, се доаѓа до заклучокот дека кај нас е неопходно што поскоро ревидирање и иновирање на овие прописи. Тоа без сомнение би довело до ублажување на условите за безбедност особено во делот на малите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

Пример 1.2. Еднблоковите 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 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

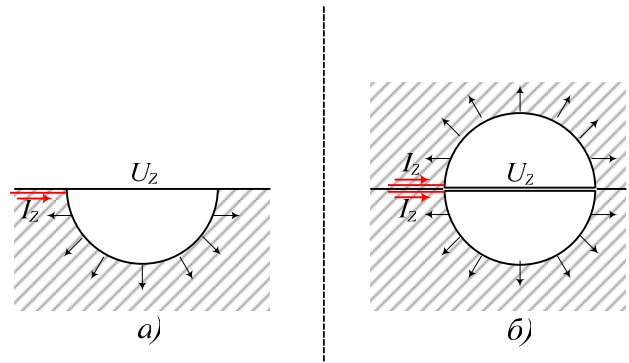
таа поставена е хомогено, со специфична отпорност $\rho = 100 \Omega\text{m}$. Ако струјата на доземен спој изнесува $I_z = 30 \text{ A}$ колкав ќе биде напонот на заземјувачот и колкави ќе бидат максималните потенцијални разлики на допир и чекор $E_{d\text{-max}}$ и $E_{c\text{-max}}$.

Колкава ќе биде потенцијалната разлика на чекор на која ќе се изложи човек кој со своите стопала ги премостил точките E и F што се наоѓаат на растојанија $r_E = 4 \text{ m}$ и $r_F = 5 \text{ m}$ и лежат на ист правец.

Бројни вредности: $D = 1,5 \text{ m}$; $r_C = 1,5 \text{ m}$; $r_D = 1,75 \text{ m}$; $r_E = 4 \text{ m}$; $r_F = 5 \text{ m}$; $I_z = 30 \text{ A}$; $\rho = 100 \Omega\text{m}$.



Слика 1



Слика 2

Решение:

Според методот лик во огледало, линиите на полето што го создава полутопката на заземјувачот што одведува во земјата струја I_z , закопана до половина во земјата (слика 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 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 2б) што е значително поедноставно. На тој начин ќе се справиме со ограниченоста на земјата и дисконтинуитетот што го воведува воздухот над нејзината површина.

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 ($r \geq R = D/2$), 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.

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

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:

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

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:

$$\varphi_A = \varphi_B = U_Z = 637 \text{ V}; \quad \varphi_C = 637 \cdot \frac{1,5}{2 \cdot 1,5} = 319 \text{ V}; \quad \varphi_D = 637 \cdot \frac{1,5}{2 \cdot 1,75} = 273 \text{ V};$$

$$\varphi_E = 637 \cdot \frac{1,5}{2 \cdot 4} = 119 \text{ V}; \quad \varphi_F = 637 \cdot \frac{1,5}{2 \cdot 5} = 96 \text{ V}.$$

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 С и D:

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

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:

$$s_d = 1 + 0,0015 \cdot \rho = 1,15; \quad U_{d.\max} = E_{d.\max} / s_d = 318 / 1,15 = 277 \text{ V};$$

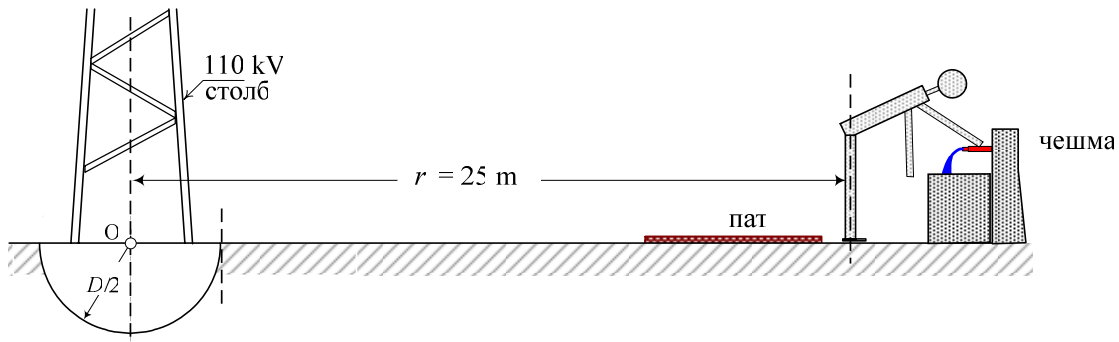
$$s_c = 1 + 0,006 \cdot \rho = 1,60; \quad U_{c.\max} = E_{c.\max} / s_c = 364 / 1,60 = 228 \text{ V}.$$

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 $r = 25 \text{ m}$ од оската на столб од еден 110 kV далекувод, покрај самиот пат, се наоѓа чешма за вода (слика 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 $I_{K1} = 4,2 \text{ kA}$, но само дел од неа, поточно само $10,6\%$, односно $I_Z = 445 \text{ A}$, 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 $D = 6 \text{ m}$, кој ги опфаќа сите 4 стопи. Деталниот опис на овој тип заземјувачи е даден во главата 4. Специфичната отпорност на тлото околу заземјувачот изнесува $\rho = 150 \Omega\text{m}$.



Слика 1

Електричното поле што го создава овој заземјувач во својата околина за време на одведувањето на струјата I_Z во земјата, особено на растојанија $r > D$, е сосема слично на она создадено од полето на една полутопка со пречник $D_{ek} = 0,92 \cdot D = 5,5 \text{ m}$ (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 $R_c = 1000 \Omega$ 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:

$$R_Z = \frac{\rho}{\pi \cdot D_{ek}} = \frac{150}{\pi \cdot 5,5} = 8,681 \Omega;$$

$$U_Z = R_Z \cdot I_Z = 8,681 \cdot 445 = 3863 \text{ V}.$$

Потенцијалот φ_r на стојното место на човекот ќе биде:

$$\varphi_r = \frac{\rho \cdot I_Z}{2\pi \cdot r} = \frac{150 \cdot 445}{2\pi \cdot 25} = 425 \text{ V},$$

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:

$$U_d = \frac{E_d}{s_d} = \frac{425}{1,225} = 347 \text{ V}; \quad s_d = 1 + 1,5 \cdot 10^{-3} \cdot \rho = 1,225,$$

$$I_\xi = \frac{U_d}{R_\xi} = \frac{347}{1000} = 0,347 \text{ A} \equiv 347 \text{ mA}$$

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 $I_{F.50}$. Според релацијата (1.19) ќе добиеме:

$$I_{F.50} = \frac{0,16}{t} = \frac{0,16}{0,5} = 0,32 \text{ A} \equiv 320 \text{ mA}.$$

Понатаму, во согласност со релацијата (1.21) имаме:

$$x = \frac{1}{0,18} \cdot \ln \frac{I_\xi}{I_{F.50}} = \frac{1}{0,18} \cdot \ln \frac{347}{320} = 0,059 \Rightarrow F(x) = 0,524.$$

Значи ризикот за настанување на смрт поради настанување на вентрикуларна фибрилација, во случајов, ќе биде $P\% = 52,4\%$.



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 ρ_b 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 $\rho = 50 \Omega\text{m}$. Должината на делот од столбот, закопан во земјата изнесува $l = 1,6 \text{ m}$. 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 $d = 10 \text{ cm} = 0,1 \text{ m}$. 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:

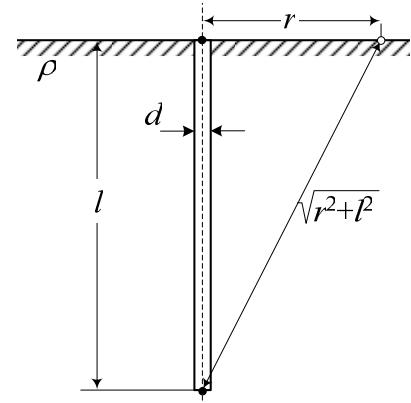
Може да се покаже дека отпорноста на распространување на вертикален заземјувач во форма на шипка со кружен пресек со пречник d и должина l (сл. 1), закопана во земја со специфична отпорност ρ , изнесува:

$$R_z = \frac{\rho}{2\pi \cdot l} \cdot \ln \frac{4l}{d}. \quad (1)$$

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:

$$\varphi(r) = \frac{\rho \cdot I_z}{4\pi \cdot l} \cdot \ln \frac{\sqrt{l^2 + r^2} + l}{\sqrt{l^2 + r^2} - l}; \quad r > d/2. \quad (1)$$

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

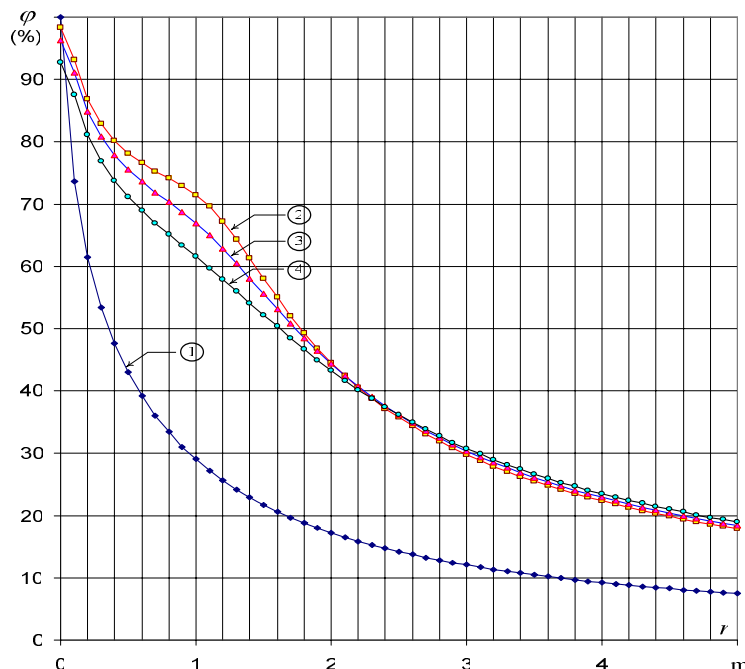


Слика 1

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

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

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:



Слика 2. Распределба на потенцијалите (%) во радијален правец $\varphi(r)$.

Легенда. 1. Постоен случај, без прстен за обликување на потенцијалот; 2. Случај кога постои прстен со пречник $D = 2,5 \text{ m}$; закопан на длабочина $h = 0,5 \text{ m}$; 3. Случај кога прстенот е закопан на длабочина $h = 0,7 \text{ m}$; 4. Случај кога прстенот е закопан на длабочина $h = 1,0 \text{ m}$.

$$I_Z = \frac{U_f}{R_Z} = \frac{U_n / \sqrt{3}}{R_Z} = \frac{231}{20,685} = 11,165 \text{ A.} \quad (4)$$

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 (1). Врз основа на таа зависност е формирана табелата 1 и кривата 1 од сл. 2. Во нив со φ е означен потенцијалот во разни точки по површината на земјата, изразен во (%) во однос на напонот на заземјувачот U_Z .

Табела 1. Табеларен приказ на зависноста $\varphi(r)$ во околината на столбот

r (m)	0.05	0.15	0.25	0.35	0.45	0.55	0.65	0.75	0.85	0.95	1.05	1.15	1.25	1.35	1.45
φ (%)	100.0	73.6	61.4	53.5	47.6	43.0	39.3	36.1	33.4	31.1	29.0	27.2	25.6	24.2	22.9
r (m)	1.55	1.65	1.75	1.85	1.95	2.05	2.15	2.25	2.35	2.45	2.55	2.65	2.75	2.85	2.95
φ (%)	21.7	20.7	19.7	18.8	18.0	17.2	16.6	15.9	15.3	14.8	14.2	13.8	13.3	12.9	12.5

Од дијаграмот прикажан на сликата 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 2, ќе имаме:

$$r_A = d / 2 = 0,05 \text{ m}; \quad \varphi_A = U_Z = 231 \text{ V};$$

$$r_B = d / 2 + 1 = 1,05 \text{ m};$$

$$\varphi_B = \frac{50}{4\pi \cdot 1,6} \cdot \ln \frac{\sqrt{1,6^2 + 1,05^2} + 1,6}{\sqrt{1,6^2 + 1,05^2} - 1,6} = 67 \text{ V (29\%);}$$

$$r_C = r_B + 1 = 2,05 \text{ m};$$

$$\varphi_C = \frac{50}{4\pi \cdot 1,6} \cdot \ln \frac{\sqrt{1,6^2 + 2,05^2} + 1,6}{\sqrt{1,6^2 + 2,05^2} - 1,6} = 40 \text{ V (17,2\%).}$$

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

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

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:

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

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

$$U_{d.\max} = \frac{E_{d.\max}}{s_d} = \frac{164}{1,075} = 153 \text{ V (66\%)} \text{ и}$$

$$U_{c.\max} = \frac{E_{c.\max}}{s_c} = \frac{164}{1,3} = 126 \text{ V (54,6\%)}$$

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 s 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 $D_1 \geq 2,0 \text{ m}$ и да биде закопан на длабочина h_1 не помала од 0,5 m (обично $h_1 = 0,7 \text{ m}$). Кога, пак, се поставуваат два кружни прстена, тогаш првиот прстен најчесто има параметри $D_1 = 2,0 \text{ m}$ и $h_1 = 0,5 \text{ m}$, додека вториот има параметри $D_2 \geq 4,0 \text{ m}$ и $h_2 = 0,8 \div 1,0 \text{ m}$.

Обично таквите прстени се изведуваат од поцинкувани челични ленти FeZn 30×4 mm×mm или поцинкувани челични жици со пречник 10 mm (Φ10) 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×mm со пречник $D = 2,5 \text{ m}$, закопан на некоја длабочина h , е прикажан на сликата 1.3.1. Кривата 2 се однесува на случајот кога е $h = 0,5 \text{ m}$, додека кривите 3 и 4 на случаите $h = 0,7$ и $1,0 \text{ m}$.

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

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 $U_{d.\max} = 58 \text{ V}$, т.е. 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 задачата 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 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:

$$s_d = 1 + 1,5 \cdot 10^{-3} \cdot \rho_p = 8,5 \Rightarrow U_{d.\max} = \frac{E_{d.\max}}{s_d} = \frac{145,5}{8,5} = 17 \text{ V};$$

$$s_c = 1 + 6 \cdot 10^{-3} \cdot \rho_p = 31 \Rightarrow U_{c.\max} = \frac{E_{c.\max}}{s_c} = \frac{145,5}{31} = 4,7 \text{ V}.$$

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 1m^2 на претходно припремен терен, во просек изнесува околу 10 €/m², 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 поефтино.



Пример 1.6. Да ја пресметаме струјата што ќе протече низ човековото тело во случајот кога човекот, кој стои на тло со специфична отпорност $\rho = 100 \Omega\text{m}$ 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:

a) 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:

$$I_{\xi} = \frac{E_d}{s_d \cdot R_{\xi}} = \frac{E_d}{(R_{pr} + R_{\xi})}. \quad (1)$$

Во последната равенка со R_{ξ} е означена отпорноста на човековото тело а со R_{pr} е означена преодната отпорност на допир, која изнесува приближно $R_{pr} = 1,5 \cdot \rho_p$. Нека претпоставиме дека човекот стои на земја која на површинскиот слој има специфична отпорност $\rho_p = \rho = 100 \Omega \cdot m$. Исто така нека го земеме најнеповолниот случај кога отпорноста на човековото тело изнесува $R_{\xi} = 1000 \Omega$ (иако е познато дека таа има вредност која се движи помеѓу 1000 и 3000 Ω). Во тој случај ќе имаме:

$$R_s = 3 \cdot \rho = 3 \cdot 100 = 300 \Omega,$$

$$R_{pr} = R_s / 2 = 150 \Omega,$$

$$I_{\xi} = \frac{E_d}{R_{\xi} + R_{pr}} = \frac{318}{1150} = 0,2765 \text{ A};$$

$$U_d = R_{\xi} \cdot I_{\xi} = 276,5 \text{ V}.$$

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 (2.1.8), ќе добиеме:

$$I_{F50} = \frac{0,16}{t} = \frac{0,16}{0,5} = 0,32 \text{ A} \equiv 320 \text{ mA}.$$

Понатаму, во согласност со релацијата (2.1.10) ќе имаме:

$$x = \frac{1}{0,18} \cdot \log \frac{I_{\xi}}{I_{F50}} = \frac{1}{0,18} \cdot \log \frac{276,5}{320} = -0,35253.$$

Бараната веројатност P ќе биде:

$$P = F(x) = F(-0,35253) = 1 - F(0,35253).$$

Од табелите во прилогот П1.1, применувајќи ја постапката на линеарна интерполација, слично како што беше тоа направено во примерот 1.1, ја отчитуваме вредноста на Гаусовата кумулативна функција на распределба што одговара на оваа вредност за x :

$$F(0,35253) \approx 0,6378 \Rightarrow F(x) = 1 - F(-x) = 0,3622.$$

Значи веројатноста P да дојде до вентрикуларна фибрилација на срцето од човекот, во случајов изнесува: $P = 0,3622$ (или $P\% = 36,22\%$).

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 $R_{\xi} = 1500 \Omega$, што е пореално, со повторување на истата постапка ќе добиеме:

$$I_{\xi} = 192,7 \text{ mA}; \quad x = -1,2234; \quad F(-x) = 0,8894; \quad P = 1 - F(-x) = 0,1106.$$

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 $R_{\zeta} = 1500 \Omega$, 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:

$$P = 0,01; \quad 1 - P = 0,99 \Rightarrow x = -F^{-1}(1-P) = -2,32635.$$

$$x = \frac{1}{0,18} \cdot \log \frac{I_{\zeta}}{I_{F50}} \Rightarrow I_{\zeta} = I_{F50} \cdot 10^{0,18 \cdot x} = 0,32 \cdot 10^{-0,18 \cdot 2,32635} = 0,122 \text{ A.}$$

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

$$E_d = (R_{\zeta} + R_d) \cdot I_{\zeta} = (1500 + 150) \cdot 0,122 = 201 \text{ V и}$$

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

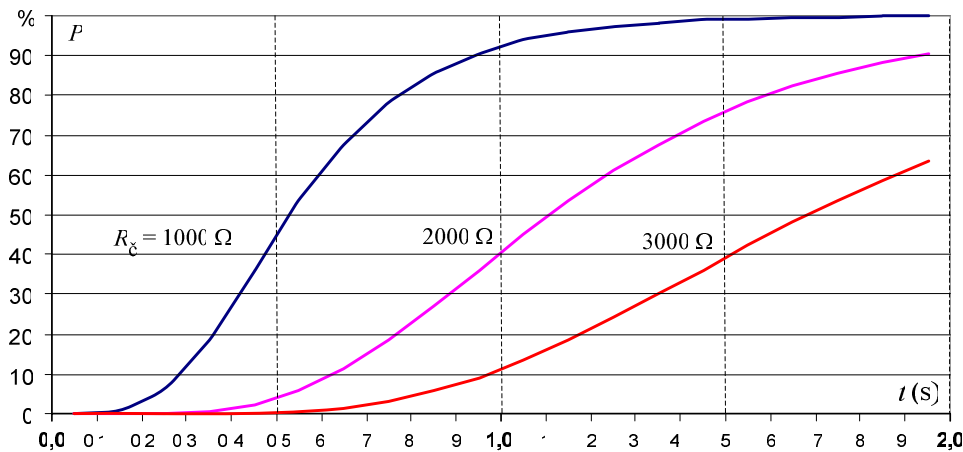
Значи во случајов сите потенцијални разлики на допир под 201 V се практично безопасни за животот на човекот.

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, се добива следната табела.

Табела 1. Ризик од појава на вентрикуларна фибрилација (%) во зависност од времетраењето на допирот. Потенцијалната разлика на допир изнесува $E_d = 318 \text{ V}$.

t (s)	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
$R_{\zeta} = 1000 \Omega$	0.00	0.52	5.65	18.65	36.22	53.49	67.71	78.28	85.68	90.66
$R_{\zeta} = 2000 \Omega$	0.00	0.00	0.06	0.52	2.14	5.65	11.26	18.65	27.21	36.23
$R_{\zeta} = 3000 \Omega$	0.00	0.00	0.00	0.02	0.13	0.52	1.42	3.08	5.65	9.17
t (s)	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9	2.0
$R_{\zeta} = 1000 \Omega$	93.94	96.08	97.46	98.35	98.92	99.29	99.53	99.69	99.79	99.86
$R_{\zeta} = 2000 \Omega$	45.13	53.49	61.05	67.71	73.43	78.28	82.33	85.68	88.42	90.66
$R_{\zeta} = 3000 \Omega$	13.55	18.65	24.27	30.20	36.23	42.21	47.99	53.49	58.63	63.37

На сликата 1 е графички прикажана зависноста $P\% = f(t)$ за разни вредности на R_{ζ} .



Слика 1. Зависност на ризикот (%) од времетраењето на струјниот удар

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

Експериментите вршени на живи луѓе покажале дека отпорот на човековото тело, R_{ξ} , меѓу другото, нелинеарно зависи и од големината на струјата I_{ξ} . Таа зависност може да се искаже со следната релација:

$$R_{\xi} = 750 + \frac{293,3}{\sqrt{I_{\xi}}}, \quad (\Omega). \quad (2).$$

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:

$$R_{\xi} = 750 + 293,3/\sqrt{I_{\xi}}$$

$$E_d = (R_{pr} + R_{\xi}) \cdot I_{\xi}$$

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

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

каде што е:

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

Решението гласи:

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

Од двете решенија ќе го усвоиме првото како реално. Значи $R_{\xi} = 1397 \Omega$.

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

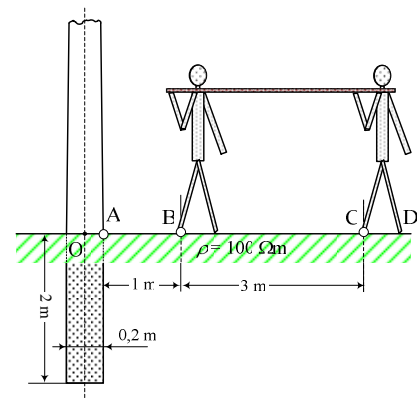
$$I_{\xi} = \frac{E_d}{R_{\xi} + R_{pr}} = \frac{318}{1397 + 150} = 0,206 \text{ A}; \quad U_d = R_{\xi} \cdot I_{\xi} = 1397 \cdot 0,206 = 287 \text{ V}.$$

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 $R_{\xi}(I_{\xi})$ дава значително помали ризици.



Пример 1.7. На сликата 1 е прикажана положбата на двајца работника кои пренесувајќи метална цевка долга $l = 3 \text{ m}$, 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 $I_Z = 40 \text{ A}$. Столбот е армирано бетонски со кружен пресек и со пречник $D = 25 \text{ cm}$. Должината на делот од столбот закопан во земјата изнесува $L_S = 2.0 \text{ m}$, додека железната арматура на столбот има еквивалентен пречник од $D_S = 20 \text{ cm} = 0,2 \text{ m}$. Да се пресмета:



Слика 1

- 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 $R_{\xi} = 1000 \Omega$.
 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 $t = 3 \text{ s}$.

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 $d = 0,2 \text{ m}$ и должина $l = 2 \text{ m}$), 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:

$$r_A = D_S / 2 = 0,1 \text{ m}; \quad \varphi_A = U_Z = 1174 \text{ V} \quad (100\%);$$

$$r_B = D_S / 2 + 1 = 1,1 \text{ m}; \quad \varphi_B = \frac{100 \cdot 40}{4\pi \cdot 2} \cdot \ln \frac{\sqrt{2^2 + 1,1^2} + 2}{\sqrt{2^2 + 1,1^2} - 2} = 433 \text{ V} \quad (36,8\%);$$

$$r_C = r_B + 1 = 4,1 \text{ m}; \quad \varphi_C = \frac{100 \cdot 40}{4\pi \cdot 2} \cdot \ln \frac{\sqrt{2^2 + 4,1^2} + 2}{\sqrt{2^2 + 4,1^2} - 2} = 150 \text{ V} \quad (12,7\%).$$

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

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

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:

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

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

$$t > 2s; \quad I_{F50} = \frac{0,16}{t} = \frac{0,16}{2} = 0,08 \text{ A} \equiv 80 \text{ mA}.$$

Понатаму, во согласност со релацијата (1.21) ќе имаме:

$$x = \frac{1}{0,18} \cdot \log \frac{I_{\xi}}{I_{F50}} = \frac{1}{0,18} \cdot \log \frac{123}{80} = 1,506.$$

Бараната веројатност P ќе биде:

$P = F(x) = F(1,506) = 0,935$. Значи ризикот е $P\% \approx 93,5\%$, т.е. скоро е сосема извесно дека во случајот ќе настрадаат обата работника.

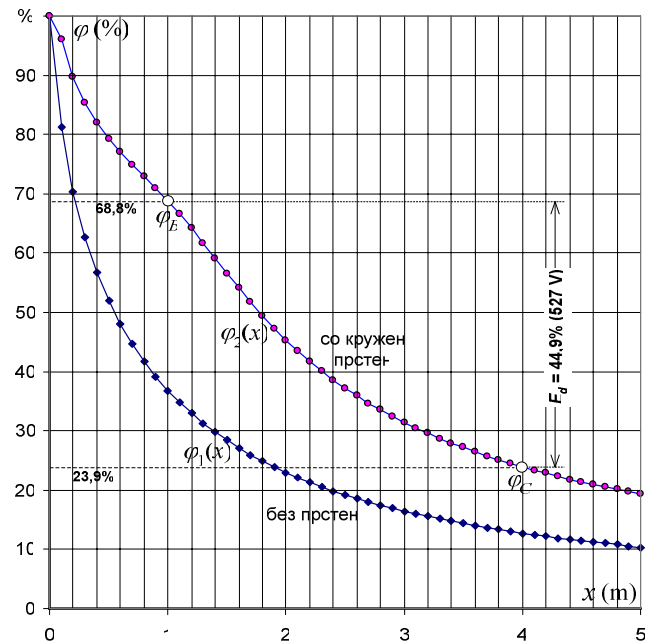
Вистинскиот ризик од опасноста е, во практиката, помал бидејќи отпорноста на човечкото тело е обично поголема од 1000Ω . Ако, на пример, земеме дека е отпорот на човечкото тело, пресметано според релацијата (2) од примерот (1.6), изнесува $R_{\xi} = 1852 \Omega$, што е пореално, со повторување на истата постапка ќе добиеме:

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

Значи може да се каже дека, во случајов, реалниот ризик е нешто помал од претходно пресметаниот но 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 цинкувана челична лента FeZn 30x4, закопана на длабочина $h = 0,7 \text{ m}$. При пресметките да се користат резултатите од сл. 1 на која се прикажани зависностите $\varphi(x)$ за случајот кога столбот нема заземјувач (крива 1) и за случајот кога постои прстениот заземјувач (крива 2) и кога отпорноста на заземјувањето изнесува $R_Z = 16,095 \Omega$.



Слика 1

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.xls"), се добиваат следните резултати.

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

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

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

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

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

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

$$I_{\xi} = 126 \text{ mA; } x = 2,082; P\% \approx 98\%.$$

■ ■ ■

Задача 1.1. Да се пресмета ризикот $P\%$ за настанување на смрт на работниците во примерот 1.7. (слика 1) ако специфичната отпорност на плото изнесува $\rho = 50 \text{ } \Omega\text{m}$.

Одговор:

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

$$R_Z = 14,678 \text{ } \Omega; U_Z = 587 \text{ V; } E_d = 142 \text{ V;}$$

$$R_{\xi} = 1000 \text{ } \Omega; I_{\xi} = 61,7 \text{ mA; } x = 0.367; P\% = 64,3\%.$$

Доколку се уважува зависноста $R_{\xi} = f(I_{\xi})$ според релацијата 2 од примерот 6, тогаш ќе имаме:

$$R_Z = 14,678 \text{ } \Omega; U_Z = 587 \text{ V; } E_d = 142 \text{ V;}$$

$$R_{\xi} = 2560 \text{ } \Omega; I_{\xi} = 26,2 \text{ mA; } x = -1.7; P\% = 4,5\%,$$

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 П.1.7.1 ќе се постигне најголемиот напон на допир на столбот да биде еднаков на дозволеениот, т.е. $U_d = U_{d,doz} = 65 \text{ V}$.

$$\text{Решение: } I_Z = 20,71 \text{ A.}$$

■ ■ ■

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 распространување R_z како и оценката на условите за безбедност да бидат изведени што е можно попрецизно.

Како што е познато, отпорноста на распространување 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 формираните 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 .

Табела 2.1 Специфични отпорности на некои почви

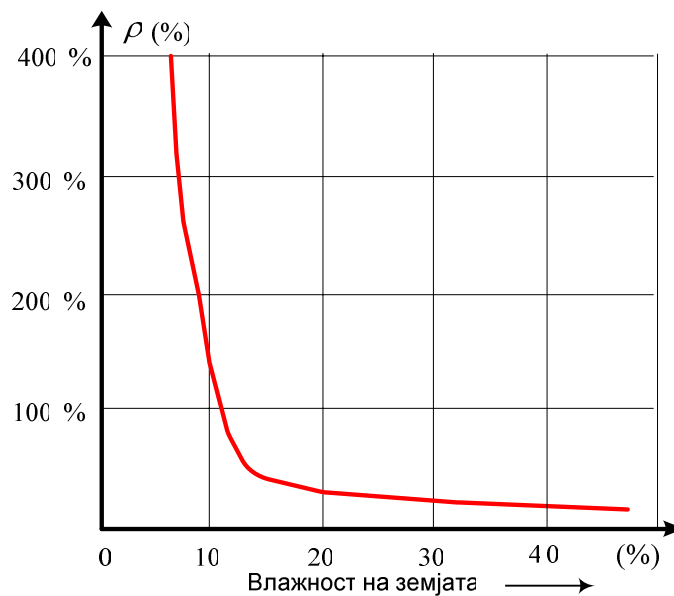
<i>Средина</i>	$\rho, (\Omega\text{m})$
Дестилирана вода	10000
Морска вода	1
Речна вода	20 ÷ 40
Варовник компактен	400 ÷ 3000
Распукан варовник	200 ÷ 2000
Песок	100 ÷ 800
Лапорец	20 ÷ 300
Глинен шкрилец	20 ÷ 200
Глина	10 ÷ 60
Хумус	≈ 10
Гнајс, метаморфни стени	500 ÷ 2000
Доломит	200 ÷ 10000
Сув бетон	1000000
Гранит, базалт и сл.	600 ÷ 10000
Чакал	200 ÷ 6000
Чакал со глина – влажен	80 ÷ 400
Глиновид песок	60 ÷ 150
Песочна глина	50 ÷ 60
Црвеница	20 ÷ 100
Бентонит	2 ÷ 8

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 $\rho = 2000 - 6000 \Omega m$, 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 распространување на некои средини.

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



Слика 2.1. Илустрација на зависноста на специфичната отпорност ρ на земјата од нејзината влажност

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.

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 1.5. Како што е видно од сликата 2.1, специфичната отпорност ρ ќе биде значително

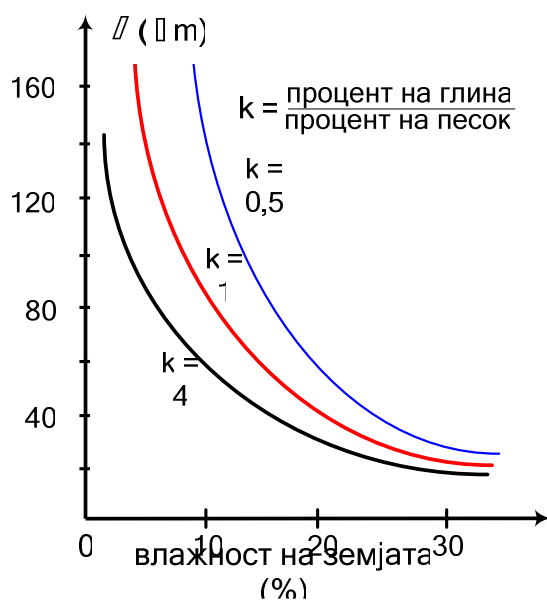
поголема доколку релативната влажност на тлото е под 15 %. За влажност на земјата над 15 % таа е многу помала а промените на отпорноста ρ со промената на влажноста е поблага.

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.

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 $0,2 \div 2 \text{ mm}$ 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 2.2 е дадена промената на специфичната отпорност на земјата (смеша од глина и песок) во зависност од процентот на влага во земјата.



Слика 2.2 Зависност на специфичната отпорност ρ на земјата (смеша од глина и песок) од процентот на влажност

Соленост на земјата

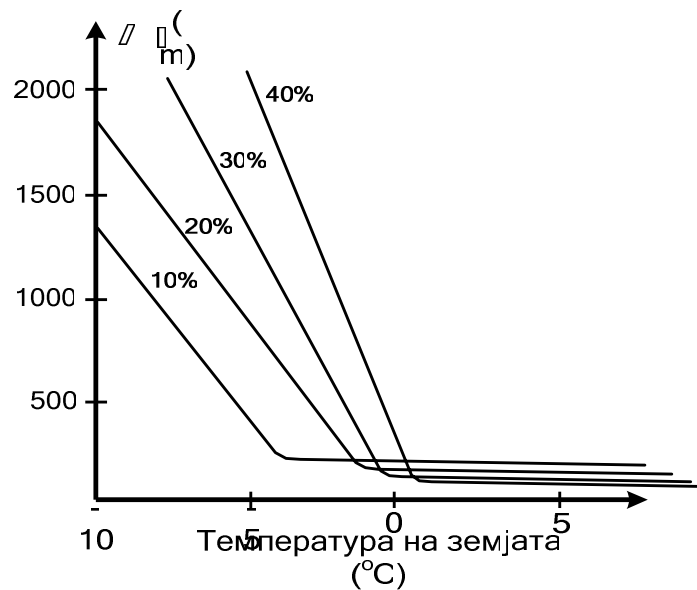
Соленоста на земјата исто така влијае врз вредноста на специфичната отпорност ρ . Некои стручњаци предлагаат ставање на сол околу заземјувачот поради нејзината способност за задржување на влагата во земјата. Доколку процентот на солта во земјата е под 0,5%, тогаш тоа практично не влијае врз намалувањето 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 $0,5 \div 1\%$.

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 слика 2.3 дадена е зависноста на специфичната отпорност на земјата од температурата при различен процент на вода во земјата.



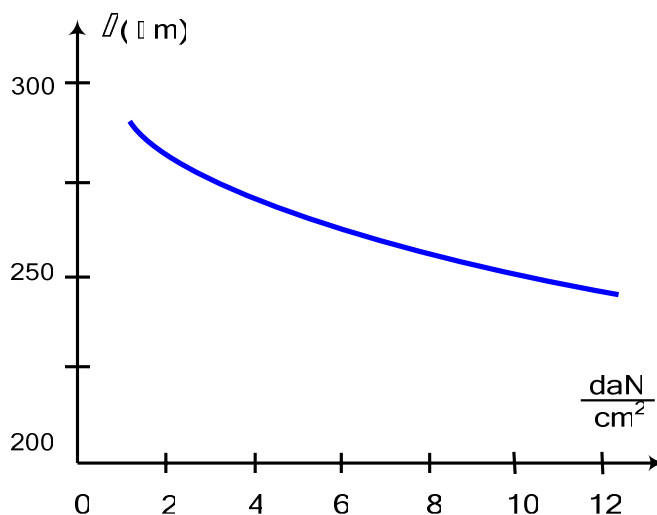
Слика 2.3. Зависност на отпорноста ρ од температурата на почвата и од нејзината влажност

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.

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 2.4 прикажано е влијанието на притисокот врз специфичната отпорност на земјата.



Слика 2.4. Влијание на притисокот врз специфичната отпорност D на земјата

2.2. МЕРЕЊЕ НА СПЕЦИФИЧНАТА ОТПОРНОСТ НА ТЛОТО

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

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

каде што е:

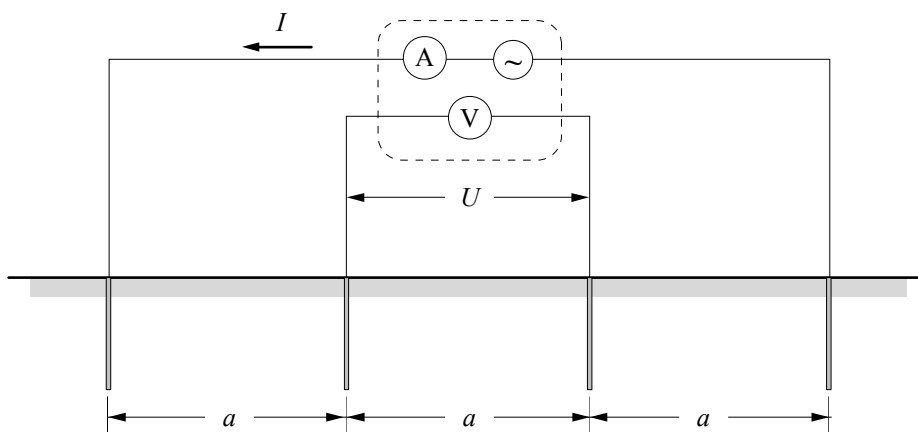
ρ – специфичната отпорност на тлото, изразена во Ωm ;

\mathcal{K} – константа на заземјувачот, која е еднаква на отпорноста на распространување 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 количество 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.



Слика 2.5. Распоред на мерните сонди според Венеровиот метод

Мерењето на вредноста на специфичната отпорност ρ во денешно време се спроведува со методи за геоелектрично сондирање. Меѓу најпознатите од нив се Шлумбергеровиот метод (Schlumberger), Венеровиот (Wenner) метод и др.

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 2.5 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 проспекција, 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 (2.2) 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 2.5.

Со формулата (1.2) 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 : $a = 1, 2, 3, 5, 8, 10 \dots$ m. На поголеми растојанија a ($a > 10$ 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).

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.

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.

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 еднонасочни 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 поцинкуваните 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.

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 нагризен и неквалитетен, 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÷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]

<i>Материјал: Поцинкуван челик</i>
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
<i>Материјал: Бакар</i>
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

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 безопасност (напоните на допир и чекор да бидат во дозволените граници), а од друга страна заземјувачот треба да биде економичен, т.е. 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.

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.

Начини за решавање и анализа

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

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

Во денешно време, со развојот на компјутерската техника и нејизната 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.

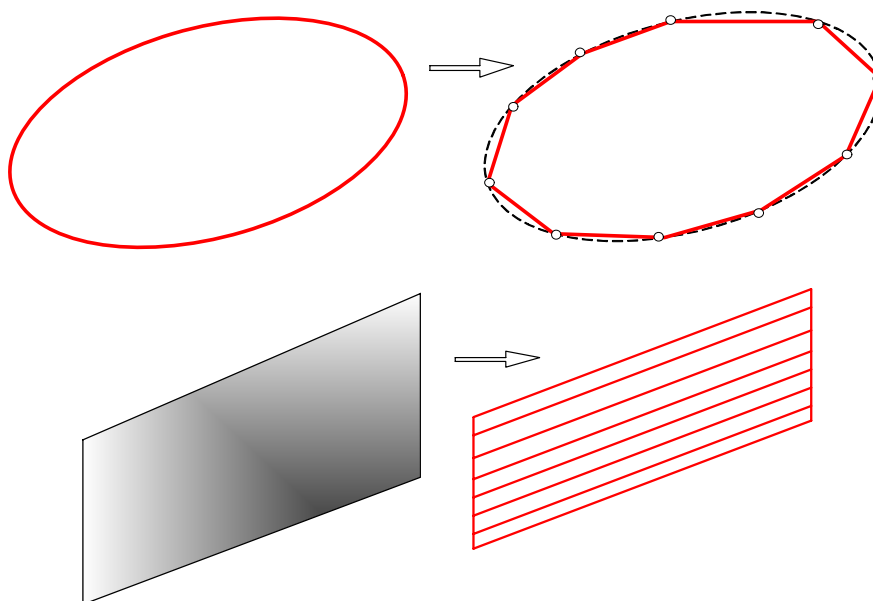
Претпоставки

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 така што 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:

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

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:

$$[\mathbf{1}]_n \cdot U_Z = [\mathbf{r}] \cdot [\mathbf{I}]. \quad (3.4)$$

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

U_Z – напон на заземјувачот према референтната земја;

$[\mathbf{1}]_n = [1 \ 1 \ \dots \ 1 \ 1]^T$ – вектор, т.е. матрица колона со димензии $[n \times 1]$ составен од единици;

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

$[\mathbf{I}] = [I_1 \ I_2 \ \dots \ I_{n-1} \ I_n]^T$ – матрица колона со димензии $[n \times 1]$ на струите кои што се одведуваат од елементите на заземјувачот во земјата.

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 :

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

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 распростирање на елементот i :

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

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:

$$I_Z = [\mathbf{1}]_n^T \times [\mathbf{I}]. \quad (3.7)$$

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

$$[\mathbf{r}]^{-1} \times [\mathbf{1}]_n \cdot U_Z = [\mathbf{I}]. \quad (3.8)$$

Ако сега обете страни на (3.8) ги помножиме од лево со $[\mathbf{1}]_n^T$, со оглед на (3.7) ќе добиеме:

$$[\mathbf{1}]_n^T \times [\mathbf{r}]^{-1} \times [\mathbf{1}]_n \cdot U_Z = [\mathbf{1}]_n^T \times [\mathbf{I}] \equiv I_Z, \quad (3.9)$$

од каде што следува:

$$R_Z = \frac{U_Z}{I_Z} = \frac{1}{[\mathbf{1}]_n^T \times [\mathbf{r}]^{-1} \times [\mathbf{1}]_n}. \quad (3.10)$$

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 $[\mathbf{y}] = [\mathbf{r}]^{-1}$.

Напонот на заземјувачот ќе биде:

$$U_Z = R_Z \cdot I_Z. \quad (3.11)$$

Сега, со помош на (3.4), можеме векторот на струите на одведување од елементите на заземјувачот $[\mathbf{I}]$, да го изразиме преку напонот на заземјувачот U_Z :

$$[\mathbf{I}] = [\mathbf{r}]^{-1} \times [\mathbf{1}]_n \cdot U_Z = [\mathbf{y}] \times [\mathbf{1}]_n \cdot U_Z \quad (3.12)$$

Од (3.12) произлегува дека струјата на одведување I_i од елементот i ќе биде, во општ случај:

$$I_i = U_Z \cdot \sum_{j=1}^n y_{ij} = U_Z \cdot (y_{i1} + y_{i2} + \dots + y_{in}); \quad i = 1, n, \quad (3.13)$$

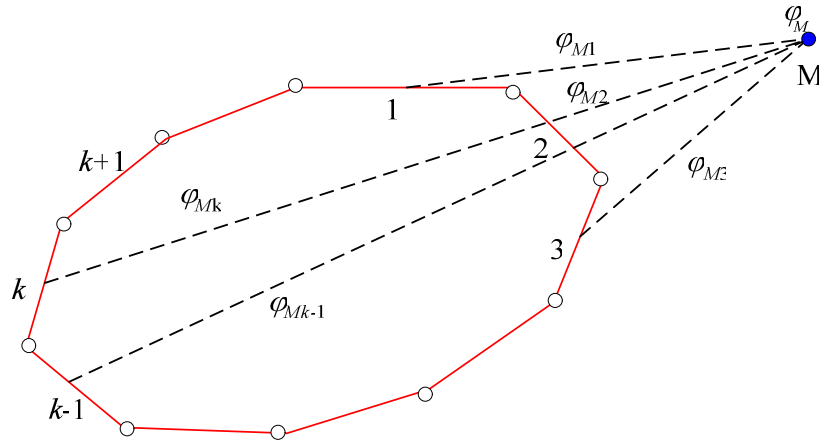
каде што со y_{ij} се означени елементите од матрицата $[\mathbf{y}] = [\mathbf{r}]^{-1}$.

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, т.е.:

$$\varphi_M = \sum_{i=1}^n r_{iM} \cdot I_i = r_{1M} I_1 + r_{2M} \cdot I_2 + \dots + r_{n-1M} \cdot I_{n-1} + r_{nM} \cdot I_n. \quad (3.14)$$

или, напишано во матрична нотација:

$$\varphi_M = [\mathbf{r}_M] \times [\mathbf{I}]. \quad (3.15)$$



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

Во последната матрична равенка со $[r_M]$ 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 M при струја на одведување $I_i = 1$, во отсуство на останатите елементи од заземјувачот.

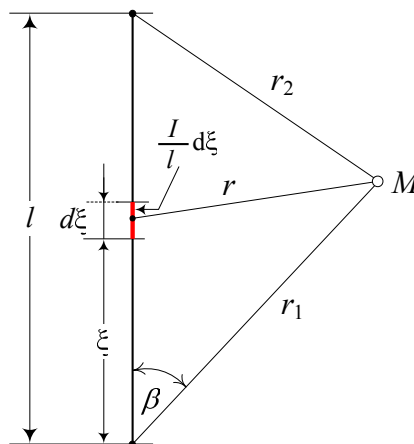
Сите наведени изрази се општи и важат генерално, за сите облици на елементите од заземјувачот. Обликот и димензиите на одделните елементи од заземјувачот, пак, како и нивната заемна положба, ги определуваат вредностите на сопствените и меѓусебните отпорности r_{ij} т.е. елементите од матрицата $[r]$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

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 сл. Тоа овозможува едноставно определување на елементите на матрицата на сопствените и меѓусебни отпорности $[r]$ со помош на компјутер.



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

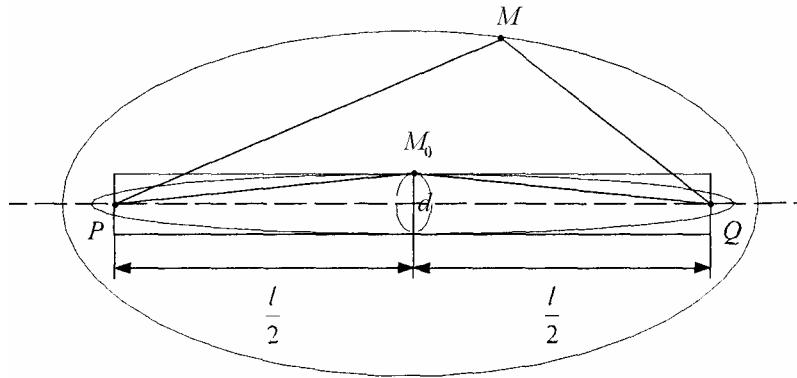
За таа цел најнапред ќе го изведеме изразот за пресметување на меѓусебната отпорност помеѓу еден праволиниски елемент од заземјувачот, кој што од сега натаму ќе го нарекуваме спроводник и точка која има произволна положба во однос на спроводникот (слика 3.3). И понатаму ќе сметаме дека спроводникот и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

Заемна отпорност помеѓу спроводник и точка

Во наредниот дел ќе го изведеме изразот за пресметка на меѓусебната отпорност α_M помеѓу спроводникот и точката М од сликата 3.3. Нека со l и d ги означиме должината и пречникот, а со I струјата на одведување од спроводникот во земјата. Ќе ги воведеме следните претпоставки за кои може да се каже дека се сосема коректни:

1) 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

2) 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 елипсоид⁵⁹⁾

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 М:

$$d\varphi_M = \frac{\rho}{4\pi} \cdot \frac{dI}{r} = \frac{\rho \cdot I}{4\pi \cdot l} \cdot \frac{d\xi}{r} \quad (3.16)$$

Вкупниот потенцијал φ_M ќе се добие со интегрирање на диференцијалниот израз (3.16). 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 М:

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

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

$$r^2 = \xi^2 + r_1^2 - 2 \cdot \xi \cdot r_1 \cdot \cos \beta, \quad (3.18)$$

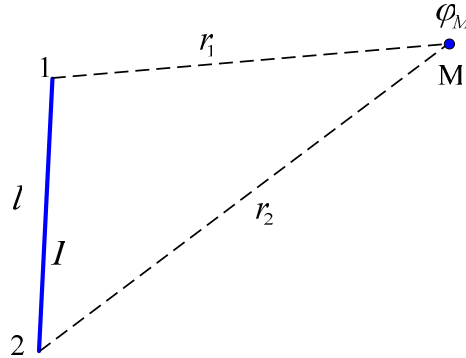
$$r_2^2 = l^2 + r_1^2 - 2 \cdot l \cdot r_1 \cdot \cos \beta, \quad (3.19)$$

Ако од (3.19) се одреди $\cos \beta$ и се замени во (3.18) ќе се добие следната релација помеѓу променливата ξ и растојанието r .

$$r^2 = \xi^2 + r_1^2 - (r_1^2 - r_2^2 + l^2) / 2. \quad (3.20)$$

Ако растојанието r , пресметано според (3.18) се замени во интегралот од (3.17) и се реши, ќе се добие следниот израз за меѓусебната отпорност α_M [4]:

$$\alpha_M = \frac{\rho}{4\pi l} \cdot \ln \frac{r_1 + r_2 + l}{r_1 + r_2 - l}. \quad (3.21)$$



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 $I = 1$.

Како што беше нагласено на почетокот, за да можеме да го применуваме изразот (3.17), праволинискиот спроводник, со оглед на односот $l \gg d$, ќе го еквивалентираме со обртен елипсоид околу оската на спроводникот (слика 3.2) 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 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:

$$\alpha_M = \frac{\varphi_M}{I} = \frac{\varphi}{I} \equiv \alpha_s. \quad (3.22)$$

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 M ја поставиме на површината од спроводникот точно на неговата средина ($M \equiv M_0$), како на сликата 3.2, тогаш ќе биде:

$$r_1 = r_2 = \sqrt{\left(\frac{l}{2}\right)^2 + \left(\frac{d}{2}\right)^2} = \frac{1}{2} \cdot \sqrt{l^2 + d^2} = \frac{1}{2} \cdot l \cdot \sqrt{1 + (d/l)^2}. \quad (3.23)$$

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

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

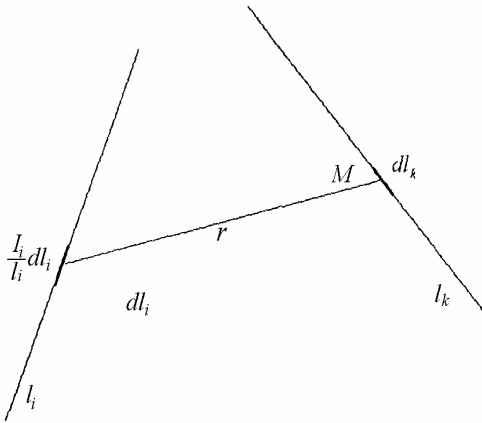
Во тој случај, врз основа на изразот (3.21) ќе добиеме:

$$\alpha_s = \frac{\rho}{4\pi l} \cdot \ln \frac{r_1 + r_2 + l}{r_1 + r_2 - l} = \frac{\rho}{4\pi l} \cdot \ln \frac{2l + d^2/2l}{d^2/2l} \approx \frac{\rho}{4\pi l} \cdot \ln \frac{4l^2}{d^2}, \quad (3.25)$$

или

$$\alpha_s = \frac{\rho}{2\pi l} \cdot \ln \frac{2l}{d}. \quad (3.26)$$

Меѓусебна отпорност помеѓу два праволиниски спроводника



Слика 3.3. Два праволиниски спроводника од еден заземјувач

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 создадено од струјата I_i што се одведува во земјата од спроводникот i , (слика 3.3) е еднаков на средната вредност на потенцијалите од точките по должината на спроводникот k т.е.:

$$\varphi_{ik} = \frac{\rho \cdot I_i}{4\pi l_i} \cdot \int_{l_k} \varphi_{iM} \cdot dl_k. \quad (3.27)$$

Потенцијалот φ_{iM} во произволна точка M на спроводникот k , што фигурира како подинтегрална величина во (3.27) се определува според изразот (3.17) односно (3.21). На тој начин се добива:

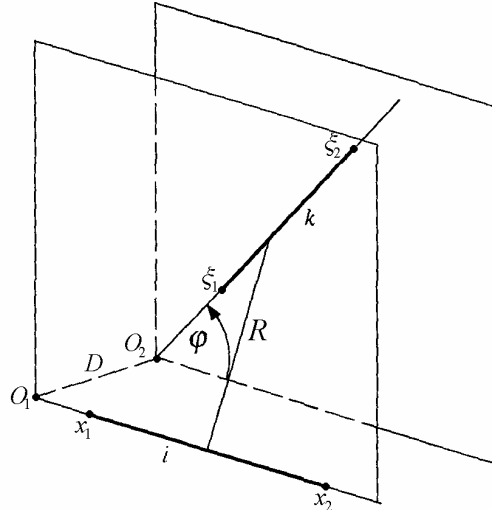
$$\alpha_{ik} = \frac{\varphi_{ik}}{I_i} = \frac{\rho}{4\pi \cdot l_i \cdot l_k} \cdot \iint_{l_i, l_k} \frac{dl_i \cdot dl_k}{r}. \quad (3.28)$$

Интегралот од изразот (3.28) е т.н. Нојманов (*Neumann*) интеграл. Тој се среќава при решавањето и на голем број други проблеми во електромагнетиката.

Решавање на Нојмановиот интеграл

Обично се решава нумерички, со нумеричка интеграција на интегралот (3.26). Но кога се работи за праволиниски елементи, како во случајот перкажан на сликата 3.3, 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 3.4. Двата спроводника се поставуваат да лежат во две паралелни рамнини, оддалечени на растојание D . Ова растојание е еднакво на отсечката $\overline{O_1 O_2}$ 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 $\overline{O_1 O_2}$. 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 3.4. Два праволиниски спроводника од еден заземјувач

Општата формула на решението на Нојмановиот интеграл гласи:

$$\int_{x_1}^{x_2} \int_{\xi_1}^{\xi_2} \frac{dx \cdot d\xi}{R} = P(x_1, \xi_1) + P(x_2, \xi_2) - P(x_1, \xi_2) - P(x_2, \xi_1) \quad (3.29)$$

каде што се:

$$P(x, \xi) = x \cdot \ln |\xi - x \cdot \cos \varphi + R| + \xi \cdot \ln |x - \xi \cdot \cos \varphi + R| + \frac{2D}{\sin \varphi} \cdot \operatorname{arctg} \left(\frac{x + \xi + R}{D} \cdot \operatorname{tg} \frac{\varphi}{2} \right) \quad (3.30)$$

$$R = R(x, \xi) = \sqrt{x^2 + \xi^2 + D^2 - 2 \cdot x \cdot \xi \cdot \cos \varphi} \quad (3.31)$$

Аголот $\psi = \operatorname{arctg} \left(\frac{x + \xi + R}{D} \cdot \operatorname{tg} \frac{\varphi}{2} \right)$, добиен во (3.30) со операцијата $\operatorname{arctg} (\)$ се изразува во радијани. Притоа, за позитивни аргументи на функцијата $\operatorname{arctg} (\)$ се зема дека е $0 \leq \psi \leq \pi/2$, додека за негативни аргументи на функцијата $\operatorname{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 (3.30) и (3.31) се добива:

$$P(x, \xi) = x \cdot \ln |\xi - x + R| + \xi \cdot \ln |x - \xi + R| + (x + \xi + R) \quad (3.32)$$

$$R = R(x, \xi) = \sqrt{(x - \xi)^2 + D^2} \quad (3.33)$$

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 (3.30) и (3.31) се добива:

$$P(x, \xi) = x \cdot \ln |\xi - x \cdot \cos \varphi + R| + \xi \cdot \ln |x - \xi \cdot \cos \varphi + R| \quad (3.34)$$

$$R = R(x, \xi) = \sqrt{x^2 + \xi^2 - 2 \cdot x \cdot \xi \cdot \cos \varphi} \quad (3.35)$$

Кога спроводниците лежат на иста права ($\varphi = D = 0$) од (3.34) и (3.35) произлегува релацијата:

$$P(x, \xi) = (x - \xi) \cdot \ln |\xi - x| - x \quad (3.36)$$

Во сите други, општи, случаи поедноставно е решавањето на Нојмановиот интеграл да се врши нумерички, применувајќи ја релацијата (3.17) како сосема едноставна за примена.

Нумеричко решавање на Нојмановиот интеграл

Равенката (3.28) е прилично едноставна и овозможува наместо со општите Џејтлинови формули, Нојмановиот интеграл да се решава нумерички. Во денешно време, кога ни се достапни современи, брзи и ефтини 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.

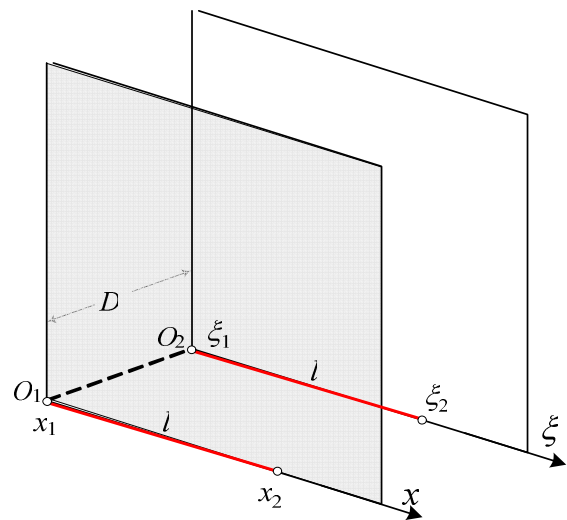
Наједноставно е да се работи со фиксен, однапред зададен број точки. Но во тој случај фиксниот број точки ќе биде веројатно преголем кај оддалечените елементи а премал кај блиските. Тогаш, во првиот случај, непотребно ќе се зголемува времето на пресметка, а во вториот, нема да биде постигната доволно 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

Пресметка на меѓусебната отпорност со директно решавање на Нојмановиот интеграл

Врз основа на сликата П.3.1.1 ќе имаме:

$$x_1 = 0; x_2 = l; \quad \xi_1 = 0 \text{ и } \xi_2 = l.$$

Понатаму, врз основа на изразите (3.32) и (3.33) можеме да пишуваме:

$$P(x, \xi) = x \cdot \ln|\xi - x + R| + \xi \cdot \ln|x - \xi + R| + (x + \xi + R) \text{ и}$$

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

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

Случај 1 – 1. $P(x_1, \xi_1) = x_1 \cdot \ln|\xi_1 - x_1 + R_{11}| + \xi_1 \cdot \ln|x_1 - \xi_1 + R_{11}| + (x_1 + \xi_1 + R_{11});$
 $P(x_1, \xi_1) = D;$

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

Случај 2 – 2. $P(x_2, \xi_2) = x_2 \cdot \ln|\xi_2 - x_2 + R_{22}| + \xi_2 \cdot \ln|x_2 - \xi_2 + R_{22}| + (x_2 + \xi_2 + R_{22});$
 $P(x_2, \xi_2) = 2l \cdot \ln D + 2l + D;$

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

Случај 1 – 2. $P(x_1, \xi_2) = x_1 \cdot \ln|\xi_2 - x_1 + R_{12}| + \xi_2 \cdot \ln|x_1 - \xi_2 + R_{12}| + (x_1 + \xi_2 + R_{12})$
 $P(x_1, \xi_2) = l \cdot \ln(\sqrt{l^2 + D^2} - l) + l + \sqrt{l^2 + D^2};$

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

Случај 2 – 1. $P(x_2, \xi_1) = x_2 \cdot \ln|\xi_1 - x_2 + R_{21}| + \xi_1 \cdot \ln|x_2 - \xi_1 + R_{21}| + (x_2 + \xi_1 + R_{21})$
 $P(x_2, \xi_1) = l \cdot \ln(\sqrt{l^2 + D^2} - l) + l + \sqrt{l^2 + D^2}.$

Понатаму, врз основа на (2,29) за Нојмановиот интеграл ќе добиеме:

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

$$\int_{x_1}^{x_2} \int_{\xi_1}^{\xi_2} \frac{dx \cdot d\xi}{r} = D + (2l \cdot \ln D + 2l + D) - 2l \cdot \ln(\sqrt{l^2 + D^2} - l) - 2\sqrt{l^2 + D^2} - 2l,$$

ИЛИ

$$\int_{x_1}^{x_2} \int_{\xi_1}^{\xi_2} \frac{dx \cdot d\xi}{r} = 2l \cdot \ln \frac{D}{\sqrt{l^2 + D^2} - l} + 2D - 2\sqrt{l^2 + D^2}.$$

И конечно, врз основа на (3.28), 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:

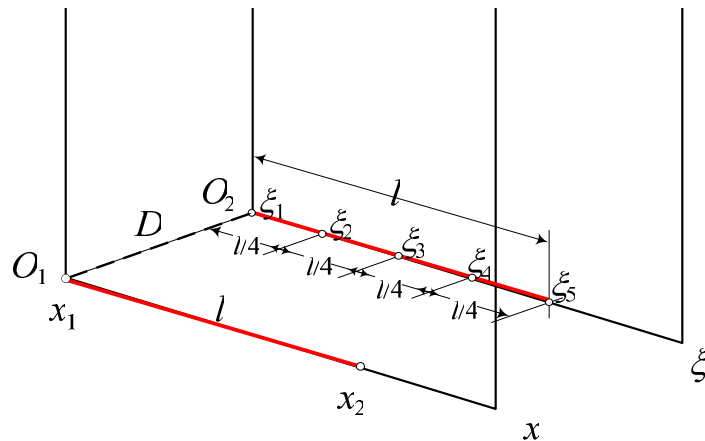
$$\alpha_m = \frac{100}{2\pi \cdot 10^2} \cdot \left[2 - \sqrt{10^2 + 2^2} + 10 \cdot \ln \frac{2}{\sqrt{10^2 + 2^2} - 10} \right] = 2,3756 \Omega.$$

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 , ($j = 1, n_t$) 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 ξ -координатите на овие $n_t = 5$ точки бидат опишани со следниот алгоритам:

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

како што е тоа прикажано на сликата П3.1.2.



Слика П.3.1.2. Нумеричко пресметување на Нојмановиот интеграл

На тој начин, врз основа на релацијата (3.21) и сликата П.3.1.2, за потенцијалот φ_1 на првата точка ξ_1 ($j = 1$) добиваме:

$$j=1; \quad \xi_1 = 0; \quad r_1 = D = 2 \text{ m}; \quad r_2 = \sqrt{D^2 + l^2} = 10,198 \text{ m}; \quad \varphi_1 = \frac{\rho \cdot I}{4\pi l} \cdot \ln \frac{r_1 + r_2 + l}{r_1 + r_2 - l} = 1,840 \text{ V}.$$

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

точка j бр.	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:

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

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 ($\alpha_{m, \text{точно}} = 2,3756 \Omega$), 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 $r_m = 2,347 \Omega$ (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 ($l = 10 \text{ m}$), кога е $D = l/2 = 5 \text{ m}$, за точност $\varepsilon = 1\%$ се потребни само $n_t = 12$ точки, додека кога е $D = l = 10 \text{ m}$, 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. Заземјувач, составен од две заемно нормални страници со должини a и b (слика П.3.2.1) е положен во неограничено хомогено тло со специфична отпорност ρ . Да се пресмета меѓусебната отпорност α_m помеѓу елементите од заземјувачот,

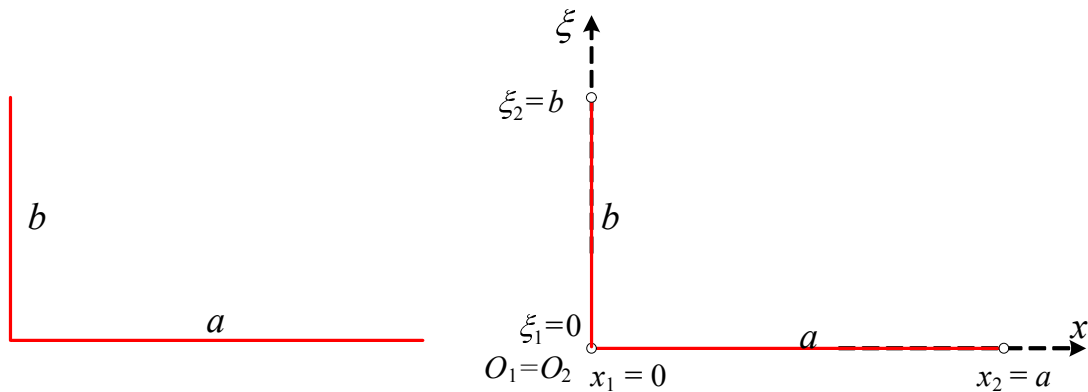
Бројни вредности: $a = 10 \text{ m}$; $d = 9 \text{ mm}$; $\rho = 100 \Omega\text{m}$; $I_Z = 10 \text{ A}$.

Решение

Меѓусебната отпорност α_m помеѓу елементите a и b од заземјувачот ќе ја пресметуваме применувајќи ги релациите (3.34) и (3.35) 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:

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

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



Слика П.3.2.1.

Врз основа на последните две релации можеме да пишуваме:

$$\text{Случај (1 - 1): } x_1 = 0; \xi_1 = 0; R = R_{11} = 0; \quad P(x_1, \xi_1) = 0;$$

$$\text{Случај (1 - 2): } x_1 = 0; \xi_2 = b; R = R_{12} = b; \quad P(x_1, \xi_2) = b \cdot \ln b;$$

$$\text{Случај (2 - 1): } x_2 = a; \xi_1 = 0; R = R_{21} = a; \quad P(x_2, \xi_1) = a \cdot \ln a;$$

$$\text{Случај (2 - 2): } x_2 = a; \xi_2 = a; R = R_{22} = c = \sqrt{a^2 + b^2}; \quad P(x_2, \xi_2) = a \cdot \ln(b + c) + b \cdot \ln(a + c);$$

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

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

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

Значи, општиот израз за меѓусебната отпорност α_m на елементите од заземјувачот прикажан на сликата П.3.2.1 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

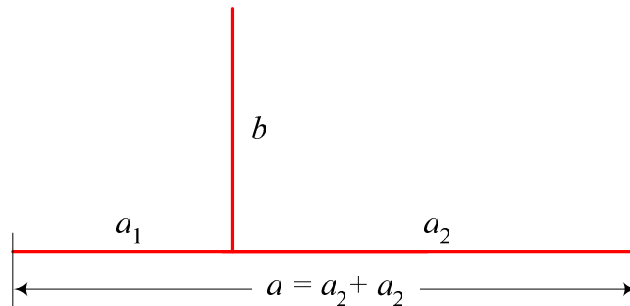
$$\alpha_m = \frac{\rho}{4\pi \cdot b} \cdot \left[\ln \frac{b + \sqrt{a^2 + b^2}}{a} + \frac{b}{a} \cdot \ln \frac{a + \sqrt{a^2 + b^2}}{b} \right].$$

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

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

□ □ □

Задача 3.1. Да се изведе изразот за меѓусебната отпорност α_m помеѓу копланарните електроди a и b од заземјувачот прикажан на сликата 3.2.1.



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:

$$\alpha_{a1,b} = \frac{\rho}{4\pi \cdot b} \cdot \left[\ln \frac{b + \sqrt{a_1^2 + b^2}}{a_1} + \frac{b}{a_1} \cdot \ln \frac{a_1 + \sqrt{a_1^2 + b^2}}{b} \right];$$

$$\alpha_{a2,b} = \frac{\rho}{4\pi \cdot b} \cdot \left[\ln \frac{b + \sqrt{a_2^2 + b^2}}{a_2} + \frac{b}{a_2} \cdot \ln \frac{a_2 + \sqrt{a_2^2 + b^2}}{b} \right].$$

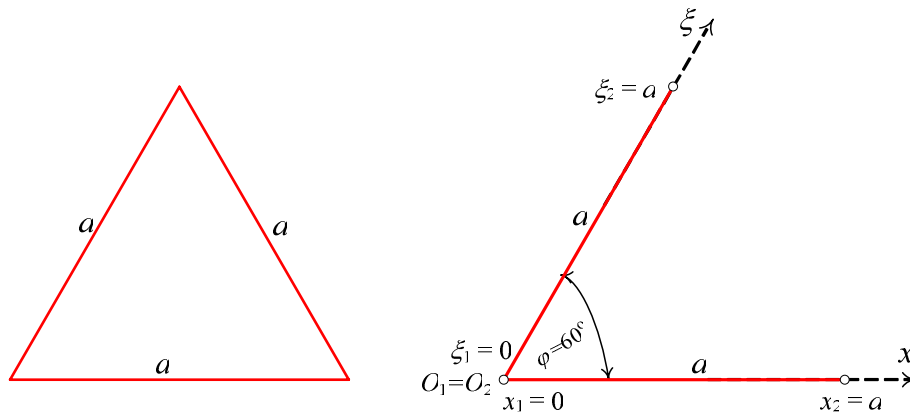
■ ■ ■

Пример 3.3. 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 распространување 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 ($i = 1, 3$) од одделните електроди на триаголникот. сите спроводници имаат ист напречен пресек и ист пречник d .

Бројни вредности: $a = 10$ m; $d = 9$ mm; $\rho = 100$ Ω m; $I_Z = 10$ A.

Решение

На сликата П.3.3.1 – 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.3.3.1 – десно).



Слика П.3.3.1.

Сопствената отпорност на спроводник со должина a и пречник d , според (3.26) 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 (3.34) и (3.35) коишто произлегуваат од општото решение на Нојмановиот интеграл за случајот кога се спроводниците компланарни ($D = 0$):

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

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

На тој начин ќе добиеме:

- (1) $x_1 = 0; \xi_1 = 0; R = 0; P(x_1, \xi_1) = 0;$
- (2) $x_1 = 0; \xi_2 = a; R = a; P(x_1, \xi_2) = a \cdot \ln(a/2);$
- (3) $x_2 = a; \xi_1 = 0; R = a; P(x_2, \xi_1) = a \cdot \ln(a/2);$
- (4) $x_2 = a; \xi_2 = a; R = a; P(x_2, \xi_2) = 2a \cdot \ln(3a/2);$

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

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

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 $[y]$:

$$[y] = [r]^{-1} = \begin{bmatrix} 0,08454 & -0,01055 & -0,01055 \\ -0,01055 & 0,08454 & -0,01055 \\ -0,01055 & -0,01055 & 0,08454 \end{bmatrix}$$

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

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

Напонот на заземјувачот, според (3.11), ќе биде:

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

Сега, со помош на (3.12) односно (3.13), можеме да го пресметаме векторот на струите на одведување од елементите на заземјувачот $[I]$: Неговите елементи I_i ($i = 1, n$) ќе бидат:

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

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:

$$I_1 = U_Z \cdot (y_{11} + y_{12} + y_{13}) = 52,543 \cdot (0,08454 - 0,01055 - 0,01055) = 3,333\dot{3} \text{ A}.$$

Слично ги добиваме и останатите струи I_2 и I_3 :

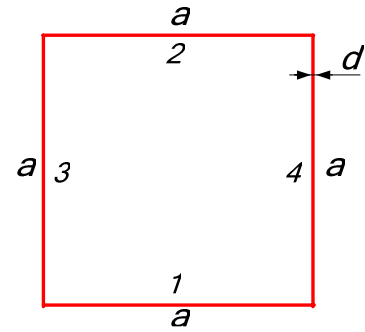
$$I_2 = I_3 = 3,333\dot{3} \text{ A}.$$

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



Пример 3.4. Да се формира матрицата $[r]$ на заземјувач во форма на квадрат со страница a , 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.

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



Слика 1

Решение

Најнапред ќе извршиме нумерација на елементите од заземјувачот како на сликата 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 (3.26):

$$\alpha_s = \frac{\rho}{2\pi a} \cdot \ln \frac{2a}{d} = \frac{100}{2\pi \cdot 10} \cdot \ln \frac{2 \cdot 10}{9 \cdot 10^{-3}} = 12,265 \Omega.$$

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 готова компјутерска програма. Ќе го избереме вториот начин и ќе ја примениме EXCEL – програмата "ALFAsm.xls". На тој начин ја добиваме следната табела за бараната матрица $[r]$ на сопствените и меѓусебните отпорности на разгледуваниот заземјувач кога е тој поставен во неограничена спроводна средина со специфична отпорност $\rho = 100 \Omega\text{m}$.

Табела П.3.4.1. Елементи на матрицата $[r]$ на сопствените и меѓусебни отпорности (Ω)

	12,265	0,744	1,400	1,400
$[r]$	0,744	12,265	1,400	1,400
=	1,400	1,400	12,265	0,744
	1,400	1,400	0,744	12,265

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:

Табела П.3.4.2. Елементи на инверзната матрица $[r]^{-1}$ (S)

	0,08370	-0,00309	-0,00868	-0,00868
$[y] = [r]^{-1} =$	-0,00309	0,08370	-0,00868	-0,00868
	-0,00868	-0,00868	0,08370	-0,00309
	-0,00868	-0,00868	-0,00309	0,08370

Со директно собирање на сите елементи од матрицата $[y] = [r]^{-1}$ ќе добиеме:

$$Y_Z = \sum_{i=1}^4 \sum_{j=1}^4 y_{ij} = 0,253 \text{ S}; \text{ и } R_Z = 1/Y_Z = 3,952 \Omega.$$

■ ■ ■

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, според релацијата (3.37):

$$r_{ij} = \alpha_{ij} + \alpha'_{ij} \quad (3.37)$$

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 М ќе биде:

$$\varphi_{iM} = r_{iM} \cdot I_i = (\alpha_{iM} + \alpha'_{iM}) \cdot I_i. \quad (3.38)$$

Ако точката М се наоѓа на површината од земјата тогаш ќе биде $\alpha_{iM} = \alpha'_{iM}$ така што изразот (3.38) ќе се упрости и ќе го има следниот облик:

$$\varphi_{iM} = r_{iM} \cdot I_i = 2 \cdot \alpha_{iM} \cdot I_i. \quad (3.39)$$

Пример 3.5. 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_T во тежиштето Т од квадратот а колкав во точката на површината од земјата Т0 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 распространување R_Z и пресметување на струите на одведување I_i ; $i = 1, n$ 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 (3.37). Значи, во општ случај, елементот r_{ii} ќе се добие како збир од сопствената отпорност α_{ii} на елементот i и меѓусебната отпорност α_{ii}' помеѓу елементот i и неговиот лик i' :

$$r_{ii} = \alpha_{ii} + \alpha_{ii}'$$

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

$$r_{ij} = \alpha_{ij} + \alpha_{ij}'$$

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 "ALFAsm.xls". Како резултат од пресметувањето на елементите на матрицата $[r]$, ќе се добие следното:

$$[r] = \begin{bmatrix} 12,265 & 0,744 & 1,400 & 1,400 \\ 0,744 & 12,265 & 1,400 & 1,400 \\ 1,400 & 1,400 & 12,265 & 0,744 \\ 1,400 & 1,400 & 0,744 & 12,265 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 2,3760 & 0,7307 & 1,1751 & 1,1751 \\ 0,7307 & 2,3760 & 1,1751 & 1,1751 \\ 1,1751 & 1,1751 & 2,3760 & 0,7307 \\ 1,1751 & 1,1751 & 0,7307 & 2,3760 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 14,641 & 1,4742 & 2,5751 & 2,5751 \\ 1,4742 & 14,641 & 2,5751 & 2,5751 \\ 2,5751 & 2,5751 & 14,641 & 1,4742 \\ 2,5751 & 2,5751 & 1,4742 & 14,641 \end{bmatrix}$$

Со инверзија на $[r]$ се добива матрицата $[y]$:

$$[y] = \text{Inv} \left(\begin{bmatrix} 14,641 & 1,4742 & 2,5751 & 2,5751 \\ 1,4742 & 14,641 & 2,5751 & 2,5751 \\ 2,5751 & 2,5751 & 14,641 & 1,4742 \\ 2,5751 & 2,5751 & 1,4742 & 14,641 \end{bmatrix} \right) = \begin{bmatrix} 0,0725 & -0,0034 & -0,0110 & -0,0110 \\ -0,0034 & 0,0725 & -0,0110 & -0,0110 \\ -0,0110 & -0,0110 & 0,0725 & -0,0034 \\ -0,0110 & -0,0110 & -0,0034 & 0,0725 \end{bmatrix}$$

Сумата $\sum y_{ij}$ на сите елементи од матрицата $[y]$ ќе биде:

$$\sum y_{ij} = 0,0725 - 0,0034 - 0,0110 - 0,0110 - 0,0034 + \dots - 0,0034 + 0,0725 = 0,1881 \text{ S.}$$

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

$$R_Z = 1/0,1881 = 5,316 \ \Omega.$$

Напонот на заземјувачот ќе биде:

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

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

$$I_1 = U_Z \cdot \sum_{j=1}^4 y_{1j} = 53,16 \cdot (0,0725 - 0,0034 - 0,0110 - 0,0110) = 2,5 \text{ A.}$$

Слично се добиваат и останатите струи:

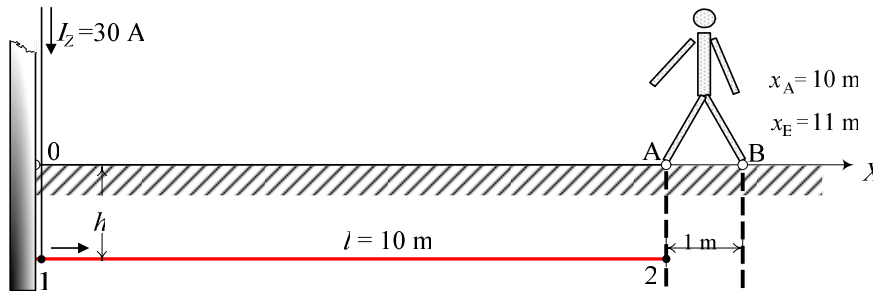
$$I_2 = I_3 = I_4 = I_1 = 2,5 \text{ A.}$$

Сега можеме да ги пресметаме потенцијалите φ_T и φ_{T0} во точките T и T0.



Пример 3.6. На сликата П.3.6.1 е прикажан заземјувач од еден дрвен столб на СН надземен вод. Заземјувачот е изведен од бакарно јаже $\text{Cu}50 \text{ mm}^2$ со должина l и пречник d , закопано на длабочина h во хомогено тло со специфична отпорност ρ . Да се пресмета отпорноста на распростирање 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 (слика П.3.6.1) 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.3.6.1.

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 (3.37) додека потенцијалите во точки на површината од земјата ќе се пресметуваат со релацијата (3.39), како суперпозиција од потенцијалите што го создава 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 (3.37), 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 α_{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 (3.37), 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.3.6.1, ќе имаме:

$$R_{1A} = \sqrt{l^2 + h^2} = \sqrt{10^2 + 1^2} = 10,05 \text{ m}; \quad R_{2A} = h = 1 \text{ m}; \quad ; R_{12} = R_{1A} + R_{2A} = 11,05 \text{ m.}$$

Потенцијалот φ_A во точката А на површина на земјата со корординати $x_A=l/2=5 \text{ m}$; $y_A=0$ и $z_A=0$, со оглед на (3.39) и сликата П.3.7.1, ќе биде:

$$\varphi_A = 2 \cdot \alpha_{iA} = 2 \cdot \frac{\rho \cdot I_Z}{4\pi \cdot l} \cdot \ln \frac{R_{1A} + R_{2A} + l}{R_{1A} + R_{2A} - l}.$$

$$\varphi_A = \frac{\rho \cdot I_Z}{2\pi l} \cdot \ln \frac{R_{12} + l}{R_{12} - l} = \frac{300 \cdot 30}{2\pi \cdot 10} \cdot \ln \frac{11,05 + 10}{11,05 - 10} = 429,45 \text{ V.}$$

На сличен начин се добива и потенцијалот во точката В на површина од земјата. Во овој случај ќе имаме:

$$R_{1B} = \sqrt{(l+1)^2 + h^2} = \sqrt{11^2 + 1^2} = 11,045 \text{ m};$$

$$R_{2B} = \sqrt{1 + h^2} = 1,414 \text{ m}; \quad R_{12} = R_{1B} + R_{2B} = 12,459 \text{ m.}$$

$$\varphi_B = 316,83 \text{ V.}$$

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:

$$s_c = 1 + 0,006 \cdot \rho = 1 + 1,8 = 2,8;$$

$$U_c = E_c / s_c = 112,62 / 2,8 = 40,2 \text{ V.}$$

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:

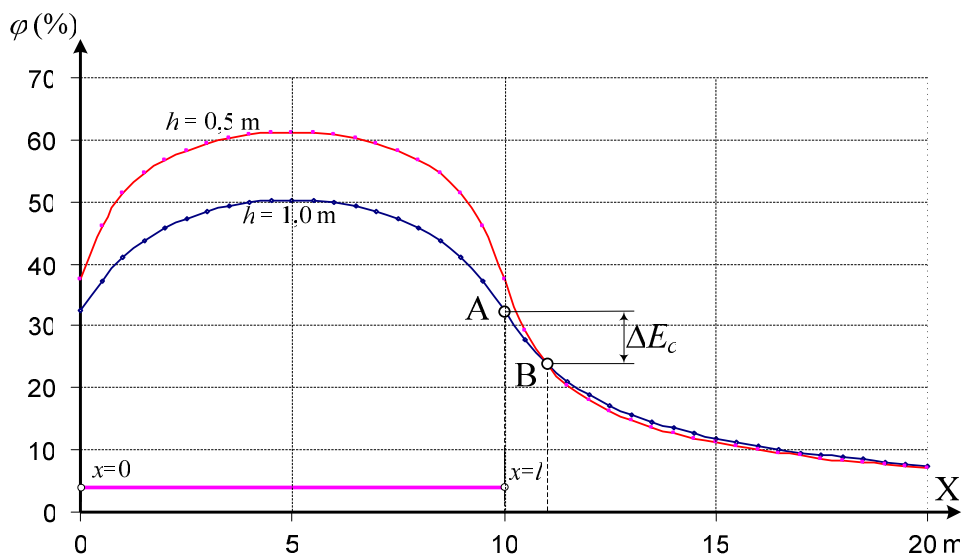
$$E_{c.\max} = \varphi(x = 9,5) - \varphi(x = 10,5) = 491,1 - 367,5 = 123,6 \text{ V (9,38\%)}$$

Меѓутоа и во овој случај напонот на чекор, којшто изнесува:

$$U_{c.\max} = 123,6 / 2,8 = 44,1 \text{ V,}$$

е повторно помал од дозволените 65 V кои што се сметаат за горна граница на дозволените (безопасни) вредности.

Со помош на програмата "ZAZEM.xls" е пресметана зависноста $\varphi(x)$ на потенцијалот на површината од земјата по должината на X-оската. Оваа зависност е графички прикажана на сликата П.3.6.2. Притоа горната крива се однесува на случајот кога длабочината на закопување на заземјувачот изнесува $h = 0,5 \text{ m}$, додека долната крива се однесува на случајот $h = 1 \text{ m}$.



Слика П.3.6.2. Зависност на потенцијалот φ (%) по должината на X-оската



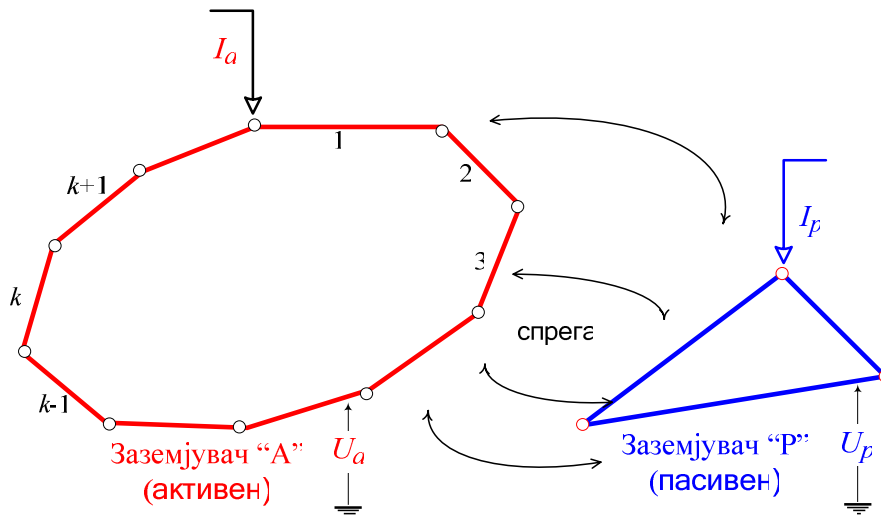
Задача 3.2*. Заземјувачот во форма на рамностран триаголник, анализиран во примерот 3.3, е поставен во земјата хоризонтално, закопан на длабочина $h = 1 \text{ m}$. Да се пресметаат елементите од матрицата $[r]$ на заземјувачот водејќи сметка и за влијанието на дисконтинуитетот на средината, т.е. за присуството на неговиот лик. Колкава ќе биде отпорноста на распространување 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 $I_Z = 10 \text{ A}$.

Напомена. Првиот дел од задачата (пресметување на елементите од матрицата $[r]$) да се изврши со примена на програмата "ALFAsm.xls", додека вториот, преостанат, дел, со програмата "ZAZEM.xls".



4. РЕШАВАЊЕ НА СПРЕГНАТИ ЗАЗЕМЈУВАЧИ

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:

$$U_Z = R_Z I_Z.$$

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), итн.

$$U_p = Z_{ek} \cdot (-I_p). \quad (4.1)$$

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.

Два заемно спрегнати заземјувача (активен и пасивен)

Посматраме два галвански одвоени заземјувача a и p со произволен облик кои се составени од n_a и n_p елементи, соодветно. За секој од нив ќе важат Максвеловите равенки од типот (3.3) односно (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 a и електродите од заземјувачот p),

$[r_{ap}] = [r_{pa}]^T$ – правоаголни матрици со димензии $n_a \times n_p$, односно $n_p \times n_a$, чии членови се меѓусебни отпорности на елементите од заземјувачот a со оние од заземјувачот p .

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:

$$[U_a] = [\mathbf{1}_a] \cdot U_a \text{ и } [U_b] = [\mathbf{1}_b] \cdot U_b, \quad (4.3)$$

каде што U_a и U_p се напоните на првиот односно вториот заземјувач, додека со $[\mathbf{1}_a]$ и $[\mathbf{1}_p]$ се означени матрици колони со n_a односно n_p редици, 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. Притоа врз основа на (3.7) можеме да ја напишеме релацијата (4.4), додека врз основа на (4.1) ќе ја напишеме релацијата (4.5).

$$I_a = [\mathbf{1}_a]^T \cdot [I_a] \quad (4.4)$$

$$U_p = -Z_{ek} \cdot I_p = -I_p / Y_{ek}, \text{ односно} \quad (4.5a)$$

$$Y_{ek} \cdot U_b + I_b = 0. \text{ Следи:} \quad (4.5б)$$

$$Y_{ek} \cdot U_b + [\mathbf{1}_b]^T \cdot [I_b] = 0. \quad (4.5в)$$

На тој начин добивме линеарен систем од (n_a+n_p+2) равенки со ист толкав број непознати. Непознати се струите на одведување $[I_a]$ и $[I_p]$ од првиот односно вториот заземјувач и двата напона на заземјувачите U_a и U_p .

Од равенките (4.2) и (4.3) произлегува:

$$\begin{bmatrix} U_a \cdot [\mathbf{1}_a] \\ U_b \cdot [\mathbf{1}_p] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [r_{aa}] & [r_{ap}] \\ [r_{pa}] & [r_{pp}] \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} [I_a] \\ [I_p] \end{bmatrix} \quad (4.6)$$

или

$$\begin{bmatrix} [r_{aa}] & [r_{ab}] \\ [r_{ba}] & [r_{bb}] \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} [I_a] \\ [I_b] \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} U_a & [\mathbf{1}_a] \\ U_b & [\mathbf{1}_b] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [\mathbf{0}_a] \\ [\mathbf{0}_b] \end{bmatrix}. \quad (4.7)$$

Во (4.7) со $[\mathbf{0}_a]$ и $[\mathbf{0}_p]$ 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:

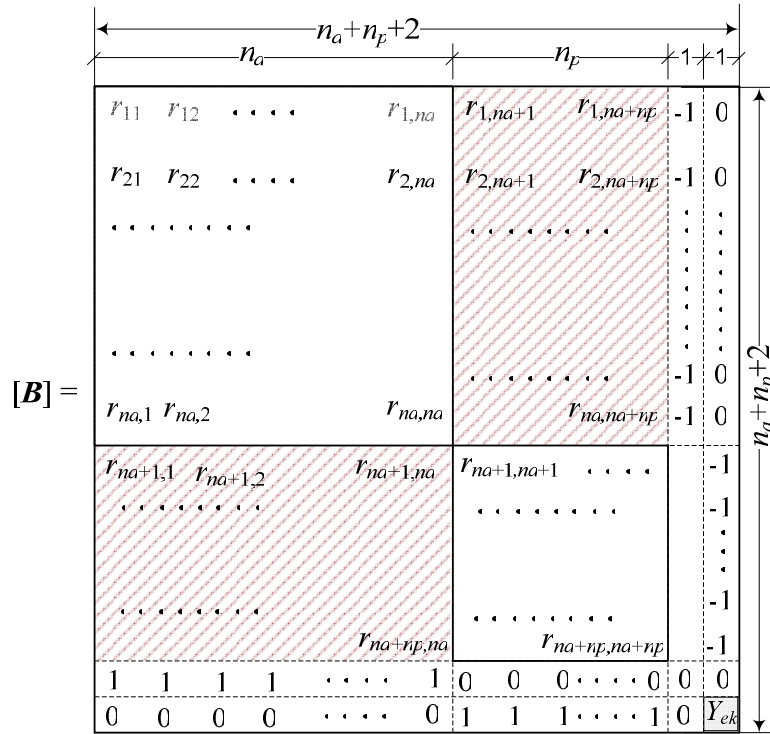
$$\begin{bmatrix} [r_{aa}] & [r_{ap}] & -[\mathbf{1}_a] & [\mathbf{0}_a] \\ [r_{pa}] & [r_{pp}] & [\mathbf{0}_p] & -[\mathbf{1}_p] \\ [\mathbf{1}_a]^T & [\mathbf{0}_p]^T & 0 & 0 \\ [\mathbf{0}_a]^T & [\mathbf{1}_p]^T & 0 & 1/Z_{ek} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} [I_a] \\ [I_p] \\ U_a \\ U_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [\mathbf{0}_a] \\ [\mathbf{0}_p] \\ I_a \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (4.8)$$

или

$$[B] \times \begin{bmatrix} [I_a] \\ [I_p] \\ U_a \\ U_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [\mathbf{0}_a] \\ [\mathbf{0}_p] \\ I_a \\ 0 \end{bmatrix}; \quad (4.9a)$$

каде што е

$$[\mathbf{B}] = \begin{bmatrix} [\mathbf{r}_{aa}] & [\mathbf{r}_{ap}] & -[\mathbf{1}_a] & [\mathbf{0}_a] \\ [\mathbf{r}_{pa}] & [\mathbf{r}_{pp}] & [\mathbf{0}_p] & -[\mathbf{1}_p] \\ [\mathbf{1}_a]^T & [\mathbf{0}_p]^T & 0 & 0 \\ [\mathbf{0}_a]^T & [\mathbf{1}_p]^T & 0 & 1/Z_{ek} \end{bmatrix} \quad (4.96)$$



Слика 4.2. Скица на структурата на матрицата $[\mathbf{B}]$

Матрицата $[\mathbf{B}]$, напишана во поразбирлива форма е прикажана на сликата 4.2:

Решението на матричниот систем равенки (4.9) гласи:

$$\begin{bmatrix} [\mathbf{I}_a] \\ [\mathbf{I}_p] \\ U_a \\ U_p \end{bmatrix} = [\mathbf{C}] \times \begin{bmatrix} [\mathbf{0}_a] \\ [\mathbf{0}_p] \\ I_a \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4.10)$$

каде што $[\mathbf{C}] = [\mathbf{B}]^{-1}$ е инверзна матрица на квадратната матрица на системот равенки (4.9a) со димензии $(n_a + n_p + 2) \times (n_a + n_p + 2)$.

На десната страна во (4.10) сите елементи се нули освен претпоследниот, со индекс $m = n_a + n_p + 1$, еднаков на струјата на одведување I_a од заземјувачот "a". Според тоа за непознатите струи и напони ќе добиеме:

$$I_a(k) = c_{km} \cdot I_a ; \quad k = 1, 2, \dots, n_a, \quad (4.11)$$

$$I_p(k) = c_{km} \cdot I_a ; \quad k = n_a + 1, n_a + 2, \dots, n_a + n_p, \quad (4.12)$$

$$U_a = c_{mm} \cdot I_a, \quad (4.13)$$

$$U_p = c_{m+1,m} \cdot I_a. \quad (4.14)$$

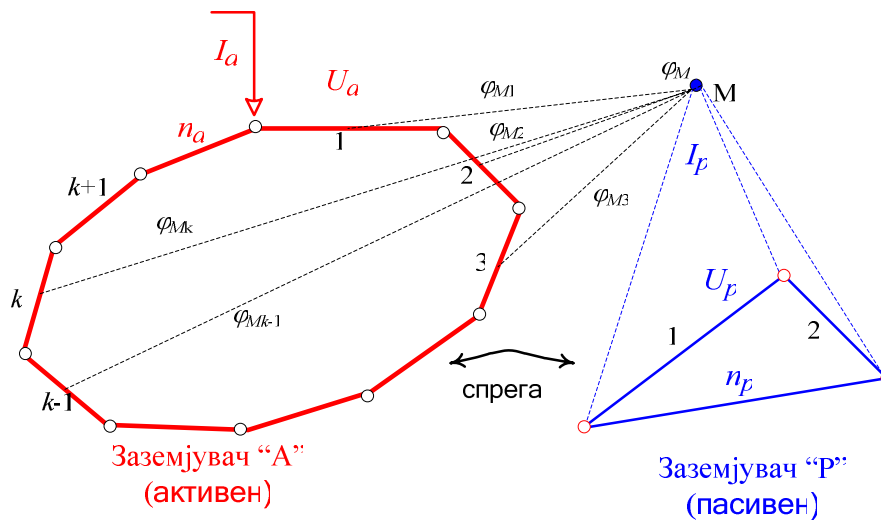
Во (4.11) со $I(k)$ е означена вредноста на струјата што се одведува од елементот k . Притоа првите n_a елементи ($k = 1, n_a$) му припаѓаат на првиот заземјувач "а", додека следните n_b елементи ($k = n_a+1, n_a+n_p$) на вториот заземјувач "р".

За сопствената отпорност на распростирање на првиот заземјувач R_{aa} при уважување на постоењето на вториот заземјувач, и за меѓусебната отпорност $R_{ap} = R_{pa}$ на двата заземјувача важи:

$$R_{aa} = \frac{U_a}{I_a} = c_{mm} \text{ и } R_{ap} = \frac{U_p}{I_a} = c_{m+1,m}; \quad R_{pa} = R_{ap}. \quad (4.15)$$

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 (4.16). 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 .

$$\varphi_M = [r_{aM}]^T \cdot [I_a] + [r_{pM}]^T \cdot [I_p]. \quad (4.16)$$



Слика 4.3. Пресметка на потенцијал во точка создаден од спрегнатите заземјувачи (А) и (Р)

Специјални случаи

– пасивниот заземјувач е на нулти потенцијал ($U_p = 0$)

Ако пасивниот заземјувач p е на некаков начин (нпр. преку неутрален спроводник, преку металниот спроводент плашт на кабел и сл.) галвански поврзан со друг заземјувач т.е. ЗС (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 :

$$U_p = 0 \text{ и } [U_p] = [1_p] \cdot U_p = [0]. \quad (4.17)$$

Резултатите за останатите непознати U_a , $[I_a]$ и $[I_p]$ се добиваат повторно со помош на општите изрази (4.15) само што во матрицата $[B]$, дефинирана со (4.9) во последниот дијагонален член, со оглед дека $Z_{ek} = 0$, се става многу голема вредност, нпр. $Y_{ek} = 10^6$.

– пасивниот заземјувач е изолиран ($I_p = 0$)

Кога пасивниот заземјувач е изолиран тогаш ќе биде:

$$I_p = \sum_{k=n_a+1}^{n_a+n_p} I(k) = 0.$$

Резултатите за останатите непознати U_a , $[I_a]$, U_p и $[I_p]$ се добиваат повторно со помош на општите изрази (4.15) само што во матрицата $[B]$, од (4.9) во последниот дијагонален член, со оглед дека $Z_{ek} \rightarrow \infty$, се става вредност $Y_{ek} = 0$.

Изведен 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 свездиштето 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 свездиштето од трансформаторот СН/НН (овие трансформатори на НН страна секогаш имаат спрега на намотките свезда или искршена свезда) 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 т.н. *здружено заземјување*.

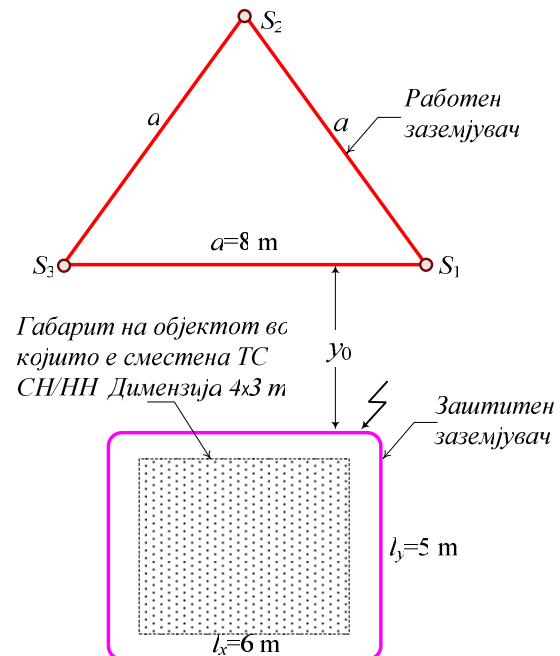
Работниот заземјувач, доколку е веќе изведен засебно, треба да биде под што е можно помало влијание на заштитниот заземјувач на постројката, за да не доаѓа до пренесување на висок потенцијал во НН мрежа кога ќе дојде до грешка (земјоспој) во СН мрежа. Според Техничката препорака [11], која и кај нас многу често се применува и спроведува во прак-

тиката, 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. За таа цел на располагање на студентите е ставена компјутерската програма “SPREGNATI ZAZEMJUVACI.xls”.

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 (слика 1). Заштитниот заземјувач претставува правоаголник со димензии $l_x \times l_y = 6 \times 5$ метри, 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 $\rho = 300$ Ω m. Растојанието y_0 помеѓу нив, дефинирано на сл. 1, изнесува $y_0 = 5$ m.



Слика 1. Скица на заземјувачите

Решение:

Решавањето на проблемот ќе го извршиме со помош на компјутерската програма “SPREGNATI Rabzaz.xls”. На првиот работен лист (**Zazem A**) ги сместуваме податоците за заштитниот (активен) заземјувач, додека на вториот работен лист, наречен (**Zazem P**) ги сместуваме податоците за работниот (пасивен) заземјувач. Пресметките ги вршиме под претпоставката дека е познат напонот на заштитниот заземјувач $U_a = 100$ V и дека пасивниот (работен) заземјувач е изолиран ($I_p = 0$).

Како резултат од пресметките ги добиваме следните вредности:

$$U_a = 100 \text{ V}; \quad U_p = 19,702 \text{ V}; \quad I_a = 4,030 \text{ A}; \quad I_p = 0; \quad U_p \% = 19,7\%$$

$$Z_{aa} = Z_{Z1} = (U_a / I_a)_{I_p=0} = 24,815 \Omega; \quad Z_{ap} = (U_p / I_a)_{I_p=0} = 4,889 \Omega.$$

Значи добивме дека во случајот кога заемното растојание изнесува $y_0 = 5$ m, т.е. кога растојанието помеѓу тежиштата на двата заземјувача изнесува $D = 10,46$ m, на работниот заземјувач ќе се пренесе околу 20% од потенцијалот на заштитниот заземјувач.

Во случајот 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 $Z_{ek} = (5+j0) \Omega$, 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.

$$U_a = 100 \text{ V}; U_p = 4,364 \text{ V}; I_a = 4,202 \text{ A}; I_p = 0,873; U_p \% = 4,36\%$$

$$Z_{Z1} = U_a / I_a = 23,799 \Omega < Z_{aa} = 24,815 \Omega.$$

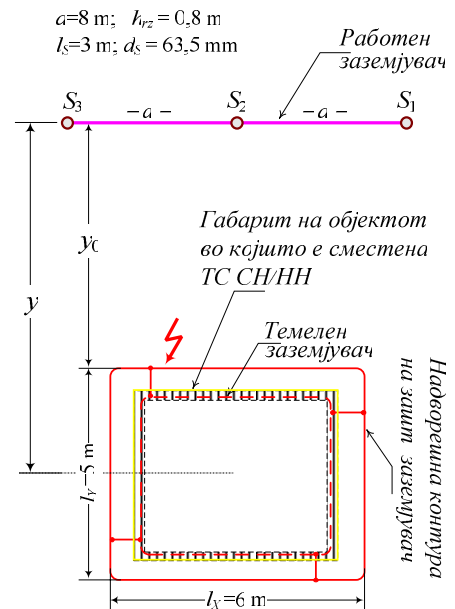
Значи во нормални околности, кога НН мрежа е исправна (без прекинат неутрален спроводник) потенцијалот што би се пренел на неутралниот спроводник преку кондуктивната спрега помеѓу заштитниот и работниот заземјувач ќе биде само 4,36% од потенцијалот на заштитниот заземјувач, што значи дека во тој случај реалната опасност од превисоки извезени потенцијали не постои. Дури при напон на заштитниот заземјувач $U_a = 1150$ 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 $\xi = y/\sqrt{A}$ (види слика 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 $h_{RZ} = 0,8$ m. Тие се поставени во права линија, на меѓусебни растојанија $a=8$ m. Секоја сонда има должина $l_S = 3$ m и пречник $d_S = 63,5$ mm. Сондите се галвански поврзани со бакарно јаже $\text{Cu}50 \text{ mm}^2$ ($d = 9$ mm), закопано на длабочина $h_{RZ} = 0,8$ m.

Заштитниот заземјувач се состои од две концентрични правоаголни контури. Првата (внатрешната) е темелен заземјувач со димензии $l_{X1} \times l_{Y1} = 4 \times 3$ m, закопан на длабочина $h_t = 0,5$ m, додека втората контура има димензии $l_X \times l_Y = 6 \times 5$ m, закопана на длабочина $h_{ZZ} = 1$ m.



Слика 1. Изглед на заземјувачите и нивен заемен распоред

Обете правоаголни контури на заштитниот заземјувач се изведени со бакарно јаже $\text{Cu}50\text{mm}^2$ ($d = 9\text{mm}$). Специфичната отпорност на плото изнесува $\rho = 100\ \Omega\text{m}$.

Анализата да се направи со помош на компјутерската програма "SPREGNATI_ZAZEMJUVACI.xls". Резултатите да се прикажан табеларно и графички. Да се извлечат заклучоци.



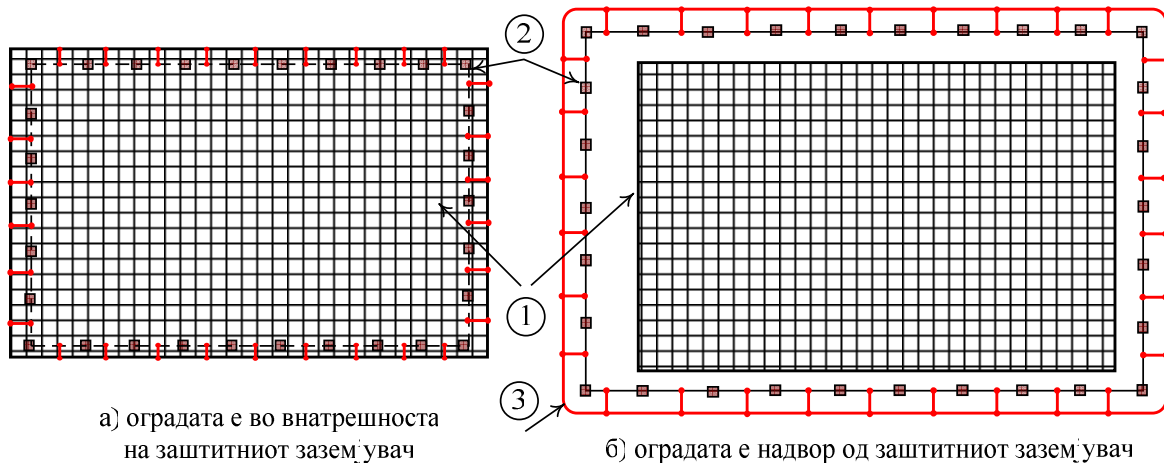
Анализа на начинот на заземјување на металната ограда на ТС

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:

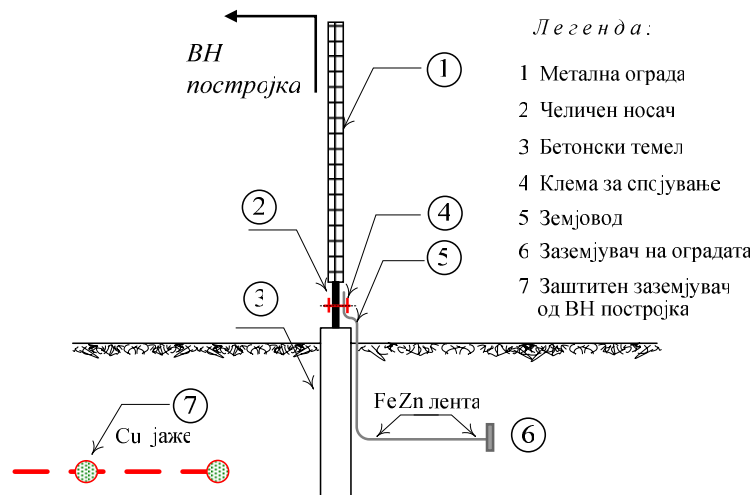
- оградата се наоѓа во внатрешноста на габаритот опфатен со заштитниот заземјувач на постројката (слика 4.4а);
- оградата излегува од габаритот опфатен со заштитниот заземјувач (слика 4.4.б).



Легенда: 1) мрежест заземјувач; 2) ограда; 3) заземјувач на оградата

Слика 4.4. Начини на поставување на металната ограда од една постројка

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.



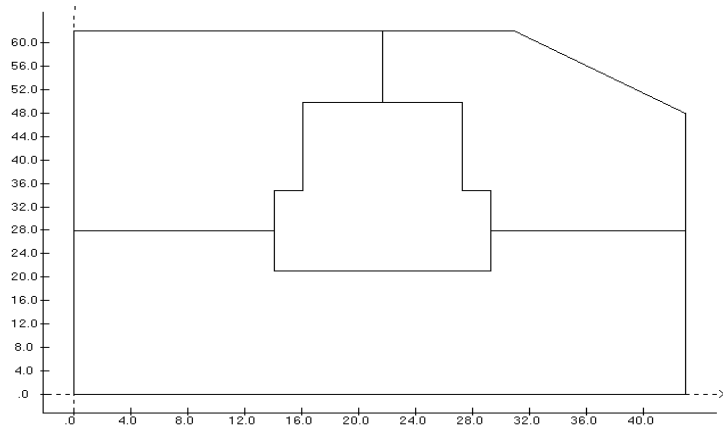
Слика 4.5. Начин на заземјување на металната ограда од електроенергетските постројки

Во првиот случај (сл. 4.4а) оградата го има потенцијалот на заштитниот заземјувач 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.

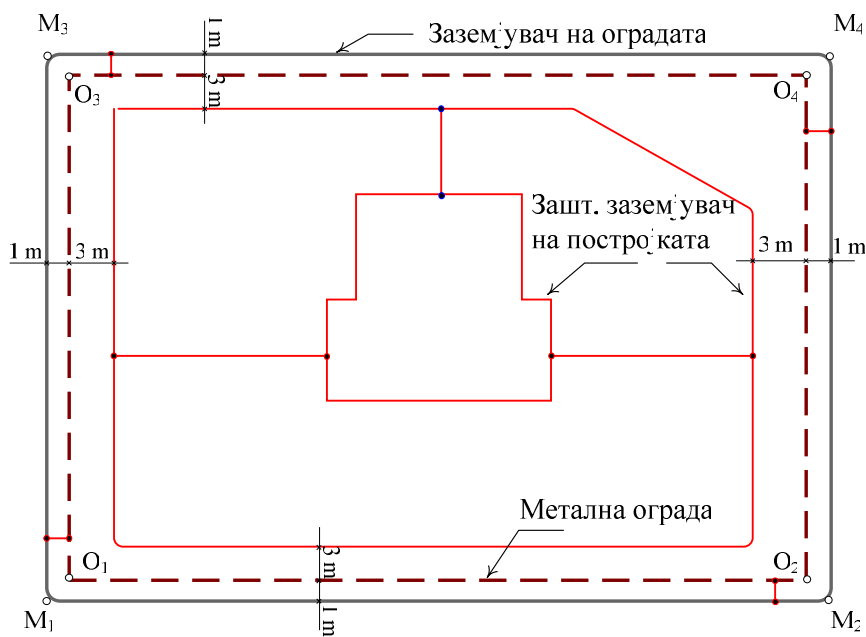
Вториот случај (сл. 4.4б) се сведува на случајот на два галвански одвоени, но кондуктивно спрегнати, заземјувачи. Заштитниот заземјувач на постројката ќе ја има улогата на активниот, додека заземјувачот од металната ограда ќе биде пасивниот заземјувач (сумарната струја на одведување во земјата од него е нула). Бидејќи пасивниот заземјувач се наоѓа во потенцијалната инка на активниот (т.е. заштитниот) заземјувач, при земјоспоеви во постројката заземјувачот 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 заземјувачот од ТС со прстенестиот заземјувач 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 програмата "SPREGNATI_ZAZEMJUVACI.xls" 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 .1. Изглед на заземјувачот на ТС 35/10 kV Оморане 2 – велешко



Слика 2. Скица на заштитниот заземјувач и заземјувачот на оградата на ТС 35/10 kV Оморане 2 (кумановско)

Металната ограда е поставена надвор од габаритот на заштитниот заземјувач и има форма на правоаголник со димензии 50×70 m. Таа е заземјена со сопствен заземјувач во форма на правоаголник со димензии 52×72 m, изведен од челична поцинкувана лента $\text{FeZn } 30 \times 4 \text{ mm}^2$, ($d_{ek} = 22 \text{ mm}$) закопана на длабочина $h_{mo} = 0,5$ m. Координатите на темињата од оградата се:

$$O_1(-3, -3); \quad O_2(47, -3); \quad O_3(-3, 67); \quad O_4(47, 67),$$

додека координатите на четирите темиња на заземјувачот на оградата $M1 \div M4$ се:

$$M_1(-4, -4); \quad M_2(48, -4); \quad M_3(-4, 68); \quad M_4(48, 68).$$

Скицата на заемната положба на заштитниот и работниот заземјувач од постројката е прикажана на сликата 2.

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 $I_z = 20$ A.



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 еднаквор 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.

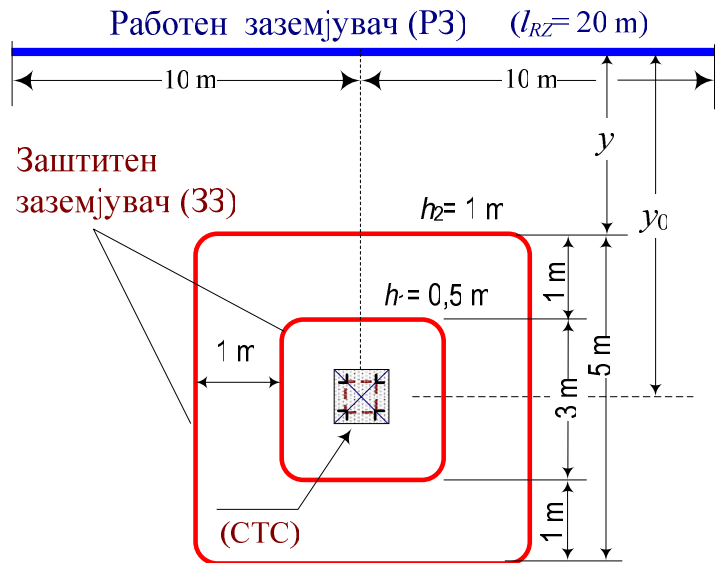
Задача 4.3. Заштитниот заземјувач (ЗЗ) на една столбна трансформаторска станица (СТС) 10/0,4 kV/kV; 250 kVA, е формиран со помош на две квадратни контури, изведени од поцинкувана челична лента FeZn 30×4 ($d = 22$ mm). Првиот квадрат има страна $a_1 = 3$ m и е закопан на длабочина $h_1 = 0,5$ m, додека вториот е со димензија $a_2 = 5$ m и е закопан на длабочина $h_2 = 1$ m (слика 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 $\rho = 300$ Ω m.

Струјата I_Z што се одведува во земјата од заштитниот заземјувач во услови на земјоспој изнесува $I_Z = 40$ A.

Со помош на програмата "SPREGNATI_ZAZEMJUVACI" 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 на y_0 и тоа: 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%.

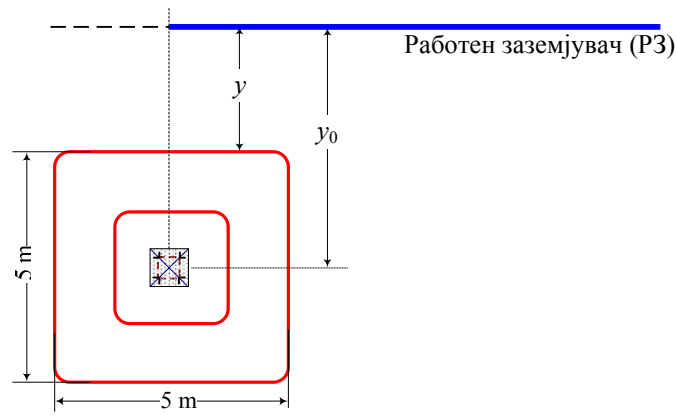
Резултатите од пресметките да се сместат во табелата 1. Анализите да се повторат и за случаите кога позицијата на РЗ во однос на ЗЗ е како на сликите 2 и 3. Кои се заклучоците во врска со заемниот распоред помеѓу работниот и заштитниот заземјувач.



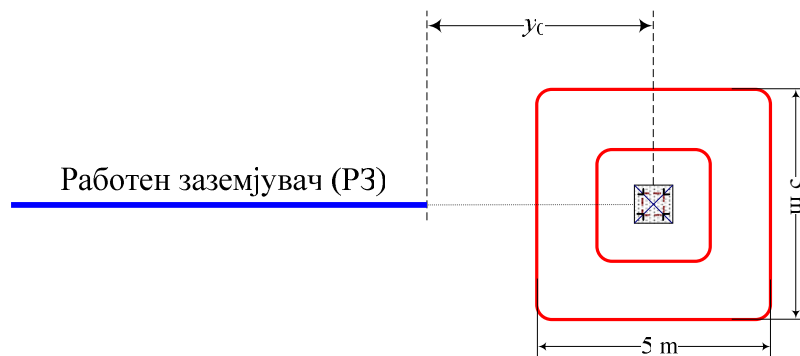
Слика 1. Изнесување на потенцијалот од заштитен на работен заземјувач (распоред 1)

Табела 1. Резултати од пресметките на разгледуваните конфигурации заземјувачи

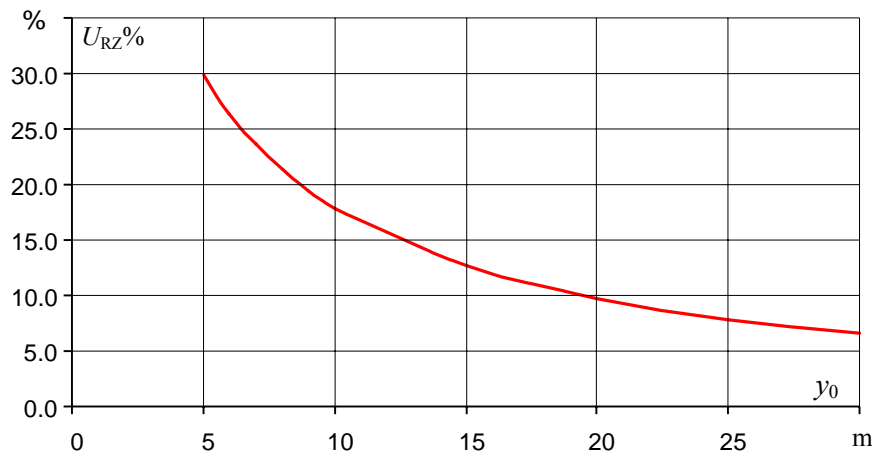
Распоред	Изнесен потенцијал	$y_0 = 5$ m	$y_0 = 10$ m	$y_0 = 15$ m	$y_0 = 20$ m	$y_{40\%}$ (m)
Според слика 1	U_{RZ} (V)					m
	U_{RZ} (%)					40%
Според слика 2	U_{RZ} (V)					m
	U_{RZ} (%)					40%
Според слика 3	U_{RZ} (V)					m
	U_{RZ} (%)					40%



Слика 2. Изнесување на потенцијалот – распоред 2



Слика 3. Изнесување на потенцијалот – распоред 3



Слика 4. Решение на проблемот од слика 1 (распоред 1)

Задача 4.4. Отпорноста на распространување на заштитниот заземјувач од столбната трансформаторска станица (СТС) од задачата 4.3, пресметана со програмата "ZAZEM.xls", $R_Z = \underline{\hspace{2cm}}$ Ω . Да се пресмета колкава ќе биде таа после поставувањето на челична водоводна цевка со неограничена должина и со надворешен пречник $d_2 = 25,4$ mm, на длабочина $h = 0,8$ m и на растојание $\delta = 0,5$ m од работ на надворешниот прстен на заземјувачот.

Напатствие. Проблемот да се реши со помош на програмата "SPREGNATI_ZAZEMJUVACI". Притоа челичната цевка може да се моделира како пасивен заземјувач составен од два хоризонтални елемента, секој со должина од по 500 m, поставени центртрирано во однос на самата столбна ТС, слично како работниот заземјувач во задачата 4.3 – распоред 1.

Извоз на потенцијал во правоаголна контура

На сликата 2.6 е прикажана ...

Да се напише нешто за проблемот на извоз на потенцијал во околината на големите мрежести заземјувачи на ТС ВН/ВН и ТС ВН/СН. Исто така да се каже нешто и за деформацијата на полето во близината на заземјените објекти (водоводна цевка, топловод, заземјен столб од НВ и сл.)

ПРИМЕРИ

....

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:

1. 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
2. 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 загорат 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 др).

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.

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 безопасност 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 плото 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 безопасност 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 ѝ припаѓаат на мрежа со ефикасно заземјена неутрална точка (а тоа се кај нас сите високонапонски водови $U_n \geq 110$ 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 распространување 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 се 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

¹ **Повратен прескок (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_i е голема или, пак, кога струјата I_i има вообичаена големина но импулсната отпорност на столбот R_i 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 прескок на изолаторот – појава наречена “повратен прескок”.

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 упростиува 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:

$$R_Z = \frac{U_{\text{подн}}}{I_M}, \quad (5.2)$$

каде што е:

R_Z отпорност на заземјувањето на посматраниот столб, без врска со заштитните јажиња (во текстот на Правилникот означен со R_{uz});

$U_{\text{подн}}$ 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 $P(I \leq I_M)$ (%)	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 .

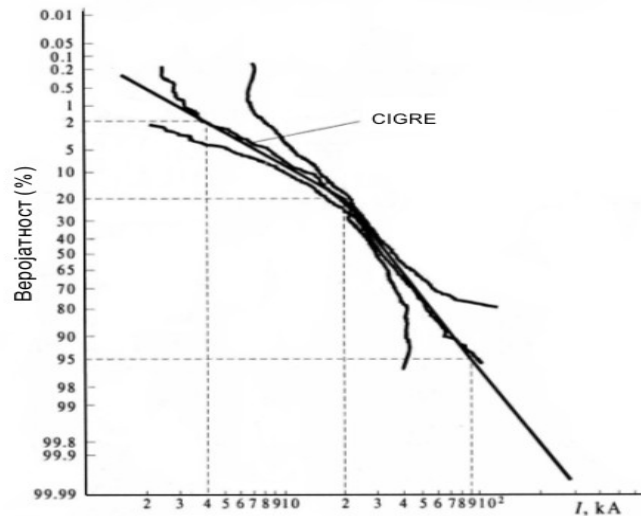
Така, на пример, од оваа табела следува дека со 95% сигурност можеме да очекуваме дека амплитудата на струјата на громот нема да ја надмине вредноста од $I_M = 40 \text{ kA}$. Ако земеме дека подносливиот ударен напон на основната изолација на еден надземен вод изнесува $U_{\text{подн}} = 496 \text{ kV}$, (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 распространување на заземјувачот изнесува $R_Z < U_{\text{подн}} / I_M = 496/40 = 12,4 \text{ } \Omega$, 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.

Според најновите сознанија кумулативната веројатност², 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 сл. 5.1. На апсцисната оска од оваа слика е нанесена големината на амплитудата на струјата на молњата (kA) во логаритамски размер додека на ординатната оска е нанесена веројатноста, изразена во (%), струјата на молњата при едно празнење да не ја надмине вредноста отчитана од апсцисната оска. Оваа веројатност е нанесена во скалата на нормалниот (Гаусов) закон на распределба.

Табела 5.2. Функција на распределба на струјата на громот според CIGRE – распределбата

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



Сл. 5.1. Кумулативна веројатност на распределба на струјата на молњата со негативен поларитет (CIGRE – распределба)

² Кумулативната веројатност се дефинира преку тнар. “функција на распределба” на случајна променливата величина. Функцијата на распределба $F(x)$ на една случајна променлива величина x се дефинира на следниот начин: $F(X) = \int_{-\infty}^X f(x) \cdot dx$ 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. $P(x \geq X)$.

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.

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.

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 ѕвезда 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 mm^2 , но не потенки од $3,5 \text{ mm}$. Дебелината на цинкот над челикот треба да изнесува најмалку $70 \text{ }\mu\text{m}$. Во исклучителен случај, кога почвата е агресивна спрема челикот (железото), како заземјувач треба да се користи бакарно јаже со пресек од најмалку 35 mm^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 $R_i < 15 \text{ }\Omega$. 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 безбедност 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 безбедност 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 spoj.

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 звезда 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 $1,0 \div 1,3 \text{ m}$ 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 $0,7 \div 0,8 \text{ m}$, додека кога постојат два (или повеќе) прстена, се поставува на длабочина од $0,5 \text{ m}$. 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 сл.) 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 безбедност 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, во тој случај 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 безбедност, 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.

5.2. ИЗВЕДБА НА ЗАЗЕМЈУВАЊЕТО НА СТОЛБОВИТЕ

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 сл., 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 предви-

дено на тоа столбно место истовремено да се изврши и обликување на потенцијалите, тогаш заземјувачот треба да има форма на кружен прстен.

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 (сл. 5.8) или како ѕвезда со четири краци (сл. 5.4). По исклучок, тие се изведуваат со два прстена (сл. 5.9) или како ѕвезда со три или два крака (сл. 5.5 ÷ сл. 5.7).

Според Препораката ТП-9 критериумот за заштита од повратен прескок е задоволен ако импулсната отпорност на заземјувањето е $R_i \leq 15 \Omega$. 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 безбедност 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 безбедност. Кај нив заземјувачите се изведуваат со два прстена.

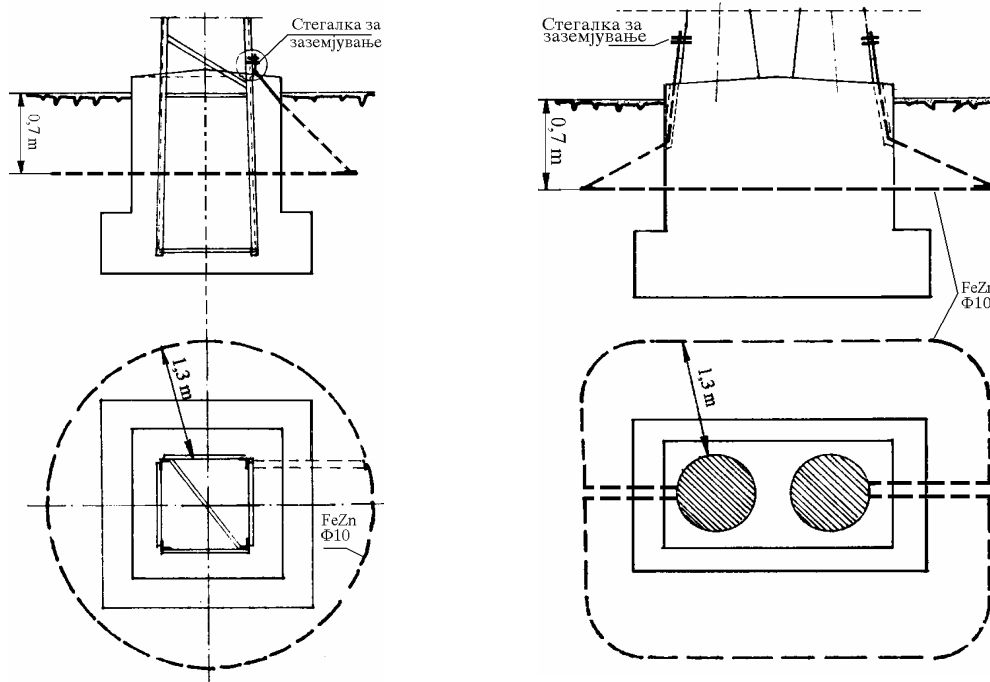
Изведба на заземјувањето на столбовите на 35 kV водови според ТП-9

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 (сл. 5.2 а) и на еден специјален бетонски столб, чиј темел има форма на правоаголник (сл. 5.2 б). 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 сл. 5.4 односно сл. 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 безбедност. Кај нив заземјувачот се изведува со два прстена, и тоа е доволна мерка за задоволување на условите за безбедност.

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.

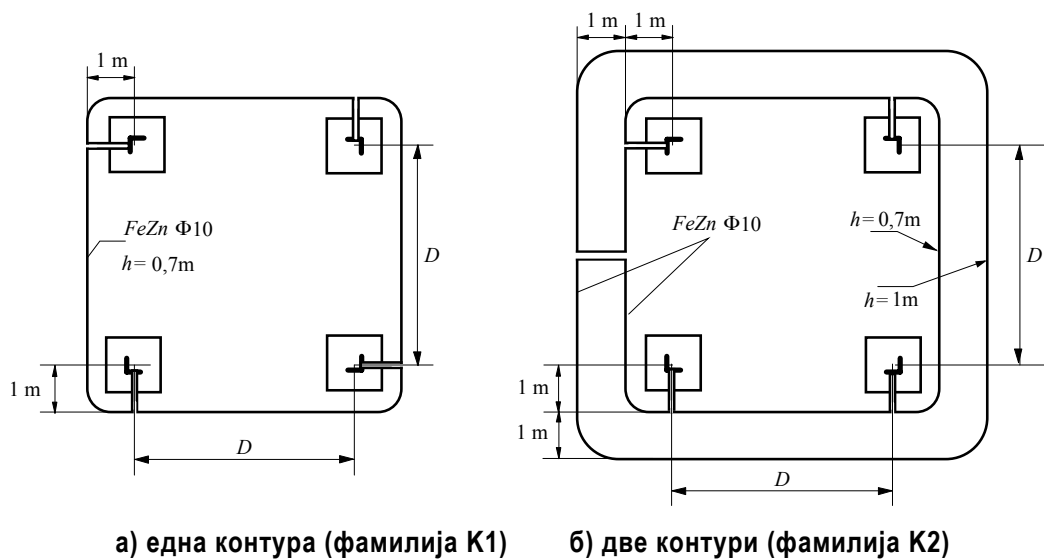
Ако некои столбови се посебно подложни на дефекти поради атмосферски празнења, треба да се подобрат заземјувачите на таквите столбови или пак да се засили изолацијата на тие столбови.



Слика 5.2. Изведба на заземјувачите кај 35 kV надземни водови:
а) кај челично-решеткаст и б) кај бетонски, специјален

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 (сл. 5.11 а, 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 $h \sim 0,7$ m и на растојание 1 m од работ на темелот, т.е. габаритот на столбот (сл. 5.3 а). 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.



а) една контура (фамилија K1) б) две контури (фамилија K2)

Слика 5.3. Изведба на прстенестите заземјувачите кај 110 kV водови

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 (сл. 5.3 б). Притоа, втората контура се поставува на растојание 1 m од првата и на длабочина од $h \approx 1$ m.

Неутралната точка од 110 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.

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.

10 kV и 20 kV водови 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 сл.)

Заштитно јаже не се поставува на нисконапонските водови.

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:

$$R \approx R_i \leq 15 \Omega, \text{ за столбови без заштитно јаже;}$$

$$R \leq 10 \Omega, \text{ за столбови со заштитно јаже.}$$

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.

5.3. ТИПСКИ ЗАЗЕМЈУВАЧИ НА СТОЛБОВИТЕ ОД НВ

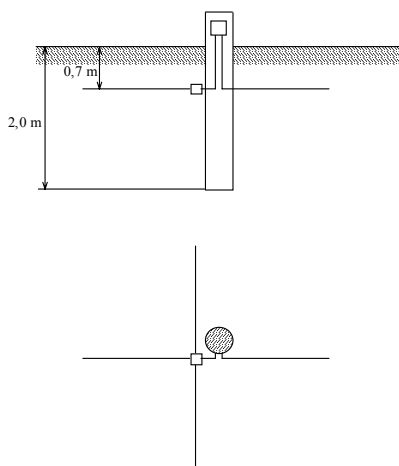
Правилникот [13] па дури и техничката препорака [12] сепак му оставаат на проектантот можност за широк избор на типот и димензиите на заземјувачот. Изборот треба да се темели на традицијата, искуството и интуицијата на проектантот. За таа цел вообичаено е воведување и работа со фамилија на т.н. “типски” заземјувачи.

Зракасти заземјувачи

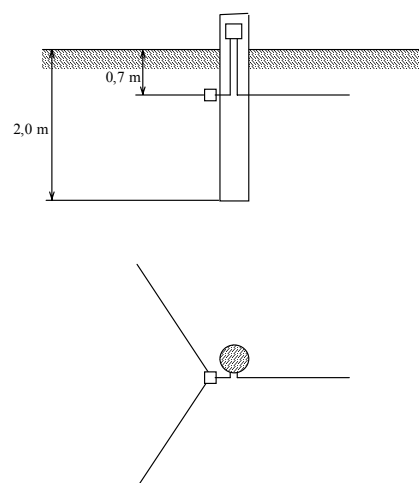
Општо гледано постојат пет фамилии “типски зракасти” заземјувачи. Се изработуваат од FeZn жица со дијаметар 10 mm ($\Phi 10$), а се разликуваат по бројот на зраци или во нивниот распоред. Должината на зраците е од 1 до 20 m, зависно од спец. отпорност ρ на тлото во кое се поставува заземјувачот и отпорноста 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. Оznakите на сите фамилии зракасти заземјувачи, воведени во учебников, започнуваат со буквата L (а оние со специфичен облик ја имаат и буквата со која се исказува 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.

Заземјувачите од фамилијата L4 се состојат од 4 зраци со иста должина, (сл. 5.4). Кај нив потенцијалната разлика на чекор E_c и допир E_d се најголеми во правец на симетралите на квадрантите.



Слика 5.4. Скица на заземјувач од фамилија L4

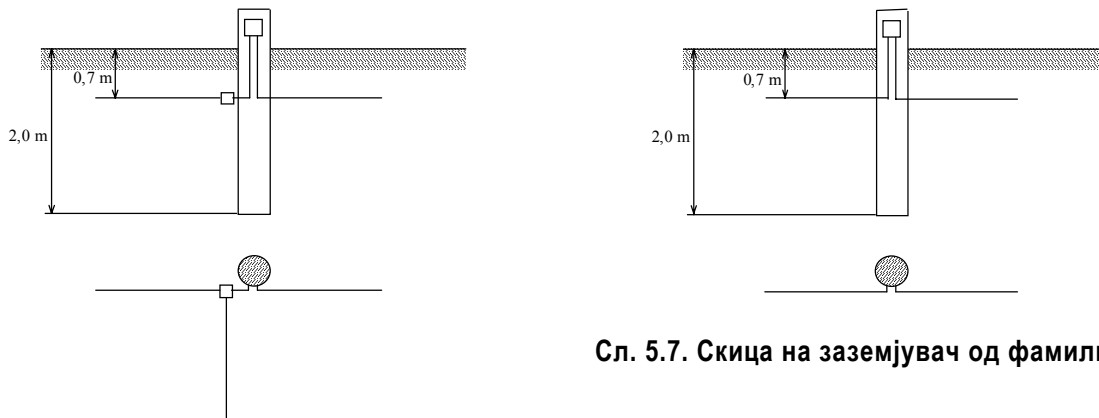


Слика 5.5. Скица на заземјувач од фамилија L3

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 “Т”, (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.

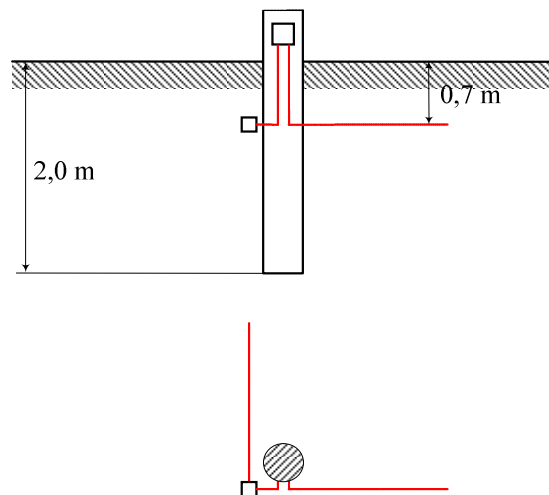
Заземјувачите од фамилијата L2 се составени од два зрака со иста должина поставени под агол од 180° (слика 5.7). Најголемите потенцијални разлики на чекор E_c и на допир E_d се јавуваат во правец нормален на краците.



Сл. 5.7. Скица на заземјувач од фамилија L2

Сл.5.6. Скица на заземјувач од фамилија LT3

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.

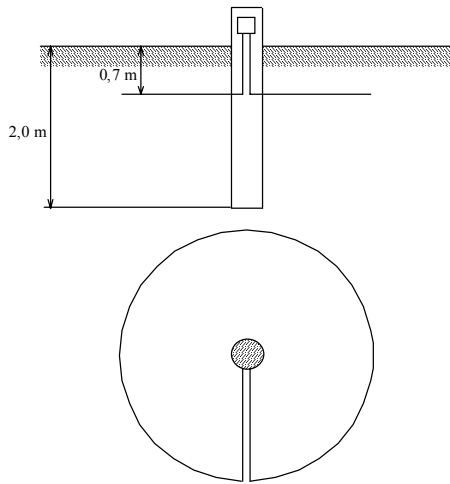


Слика 5.8. Скица на заземјувач од фамилијата LT2

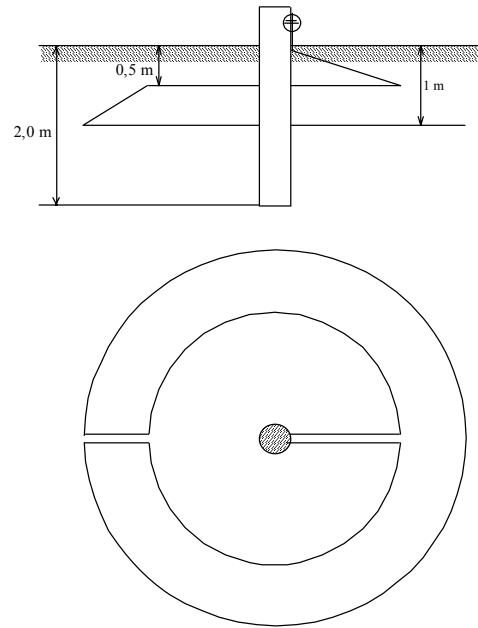
Прстенести заземјувачи

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.



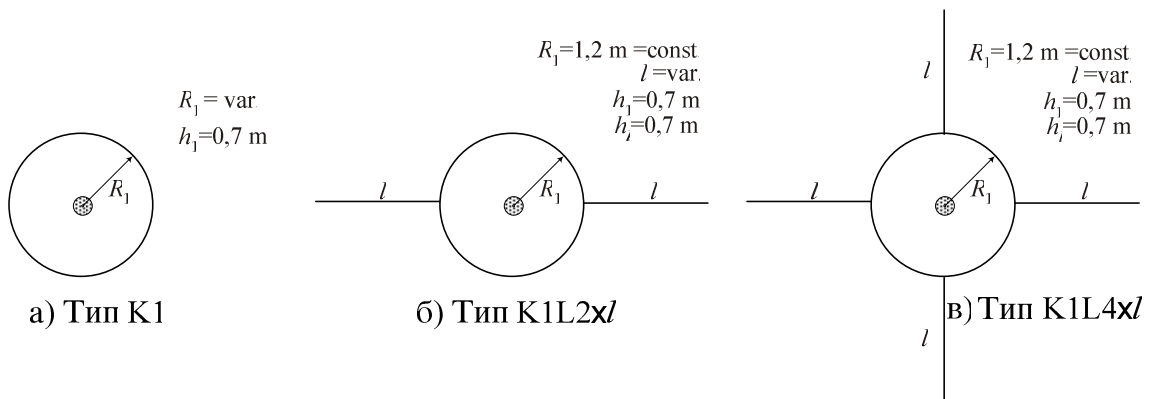
Сл. 5.9. Скица на заземјувач од фамилијата P1



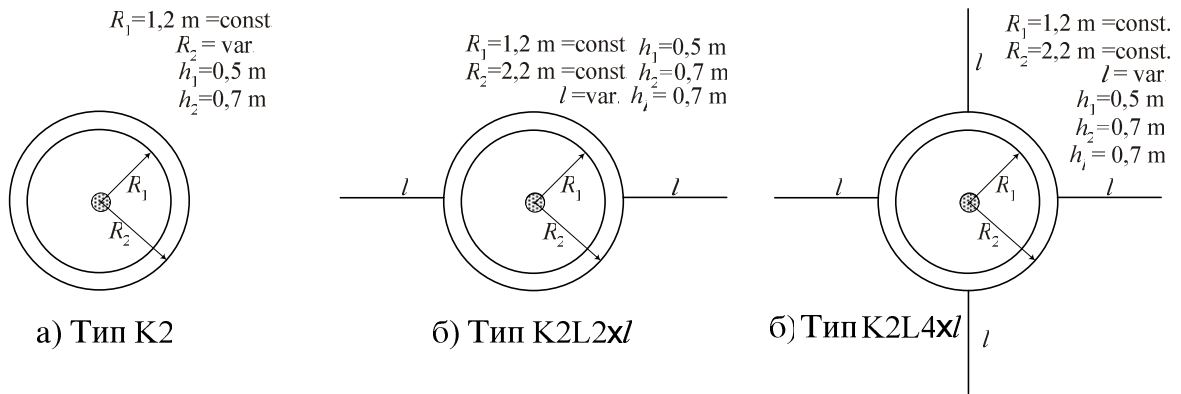
Сл. 5.10. Скица на заземјувач од фамилијата P2

Комбинирани прстенести-зракасти заземјувачи

Во [19] е предложена е фамилија типски заземјувачи за столбовите од среднонапонските 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 распространување на заземјувачот. Изгледот на овие типски форми заземјувачи е прикажан на сликите 5.11 – 5.13.

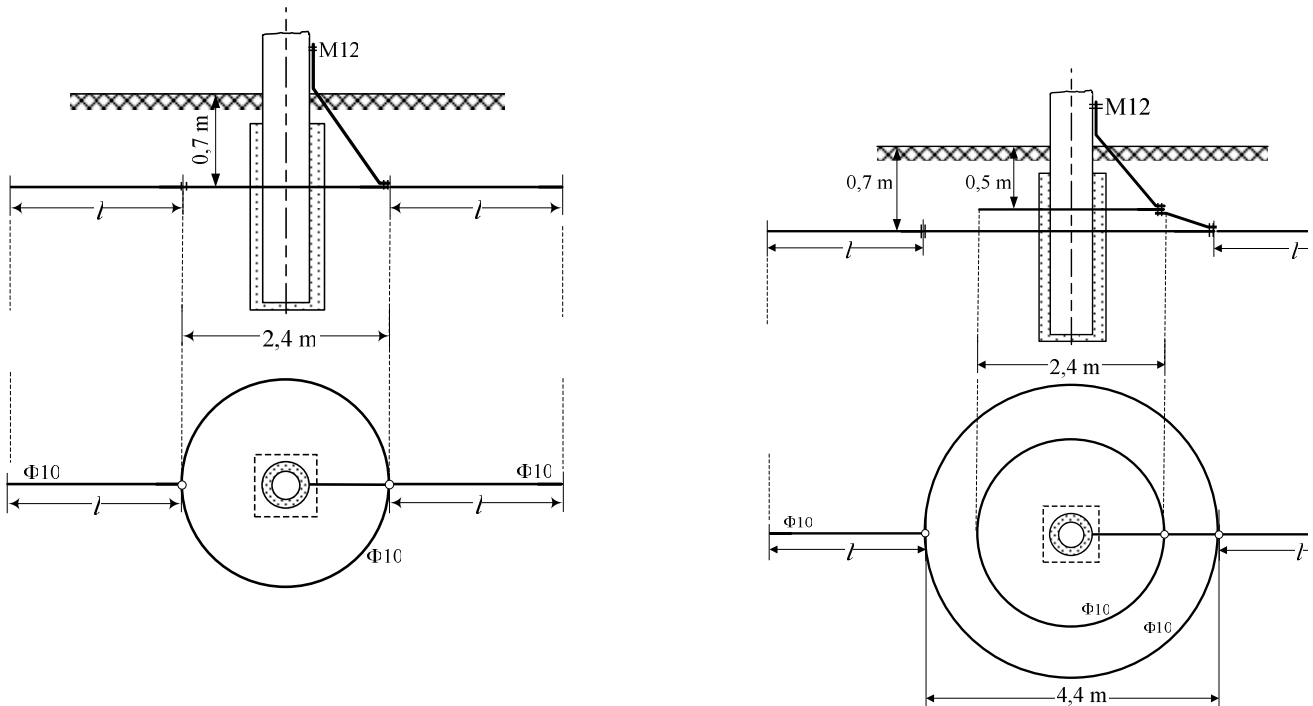


Слика 5.11. Скици на едноконтурни заземјувачи од типот K1, K1L2×l и K1L4×l



Слика 5.12. Скици на двоконтурни заземјувачи од типот К2, К2L2 x l и К2L4 x l

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.

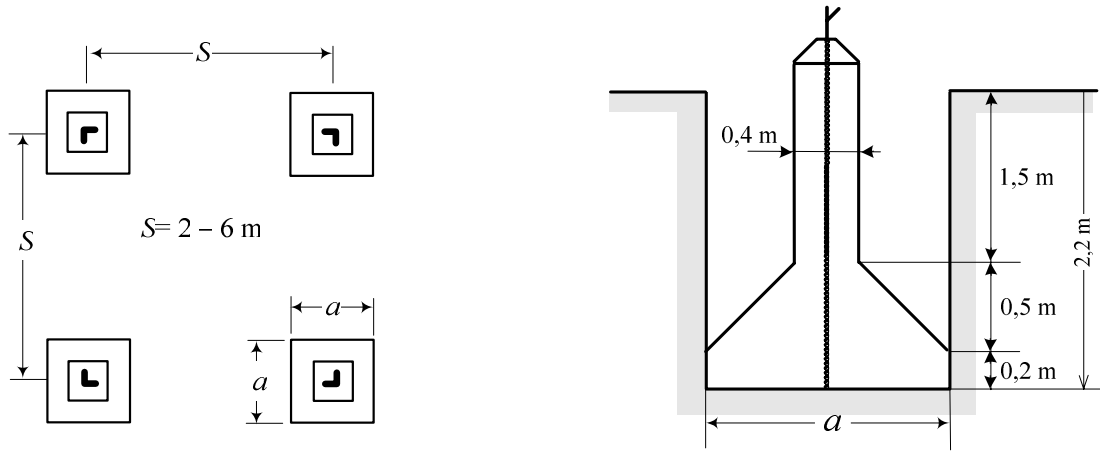


Слика 5.13. Скици на заземјувачи од типот К1L2 и К2L2

Типски заземјувачи на столбовите за висок и највисок напон ($U_n > 110 \text{ kV}$)

За заземјување на челично решеткастите 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, (сл. 5.14.а). На сл 5.14.б е прикажан надолжниот пресек на една

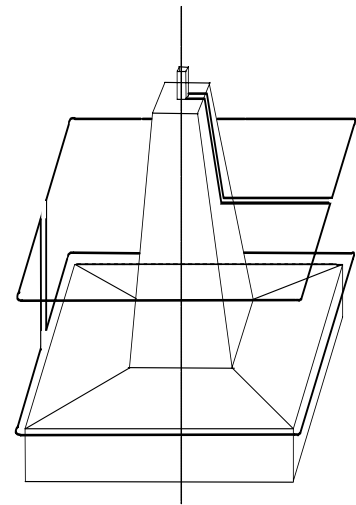
стопа со просечни димензии за еден 110 kV столб. Растојанието помеѓу стопите S , кое се движи од 2,5 m до 6 m, зависи од висината на столбовите. Вистинските димензии на стопата, пак, зависат од носивоста на тлото. Ширината на стопите кај 110 kV водови обично се движи во интервалот $1,3 \leq a \leq 1,8$ 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 5.14.б.



Слика 5.14: а) Распоред на стопите на темелот; б) Надолжен пресек на една стопа

Заедничко за сите заземјувачи на овие столбови е тоа што околу секоја од четирите стопи на темелот се поставуваат по два прстена во форма на квадрат, сл. 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 $2 \div 2,5$ m). На тој начин се добива заземјувачот од типот “А” (слика 5.16).

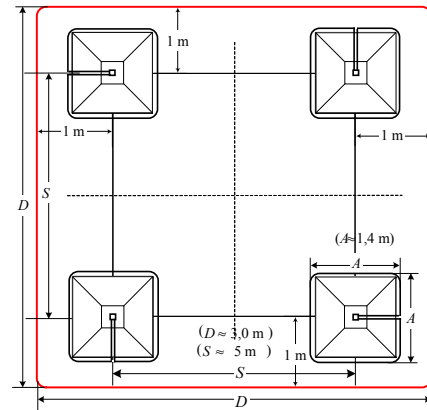
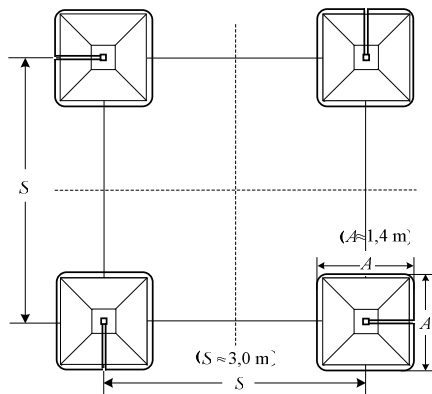
Покрај прстените, поставени околу секоја стопа, кај некои заземјувачи, означени како тип “В”, е предвидено поставување на уште еден дополнителен прстен на длабочина од $0,7 \div 0,8$ m, со кој што се опфатени сите 4 стопи од темелот. Овој прстен исто така има форма на квадрат или правоаголник со променлива страница, а неговата димензија зависи од меѓусебното растојание на стопите, т.е. повторно зависи од височината на столбот и носивоста на тлото. Се поставува така што се наоѓа на хоризонтална оддалеченост 1 m од страниците на ногарите од стопите на темелот (сл. 5.17).



Слика 5.15. Изглед на заземјувачот околу стопата

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 сл). Кај нив со вметнувањето на заедничкиот прстен околу сите 4 стопи се намалува отпорноста на распростирање 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.

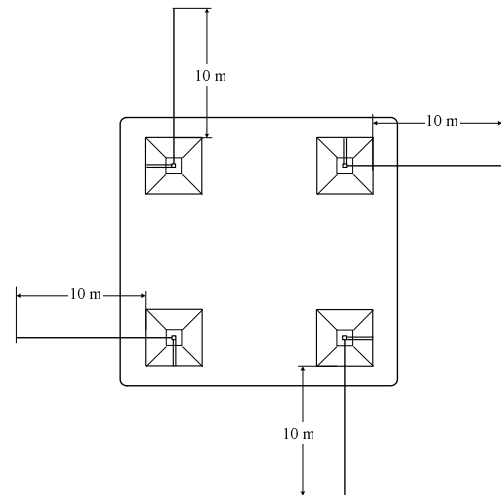
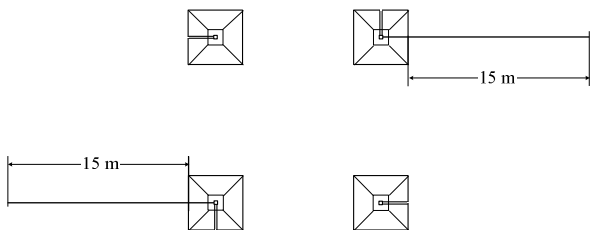
Освен прстените, поставени околу секоја стопа, понекогаш, кај некои од типските заземјувачи кај кои се бара намалување на отпорноста на распростирање R_z , се предвидува и дополнително поставување на 2 ÷ 4 хоризонтални зраци (краци или испусти). Хоризонталните зраци се особено ефикасни на терените со 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 сл. 5.18 е прикажана скицата на типски заземјувач од фамилијата A2L; ($l=15$ m), додека на сл. 5.19 е прикажана скицата на типски заземјувач од фамилијата B4L; ($l=10$ m).



Слика 5.18. Скица на заземјувачот тип “A2×15”

Слика 5.19. Скица на заземјувачот тип “B4×10”

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.

5.4. 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 “ZAZEM”.

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 1, а при тоа е опфатено и влијанието на темелите. Во наредниот дел од текстот се прикажани резултатите од некои од пресметките.

Типски заземјувачи за СН столбови 10, 20 и 35 kV

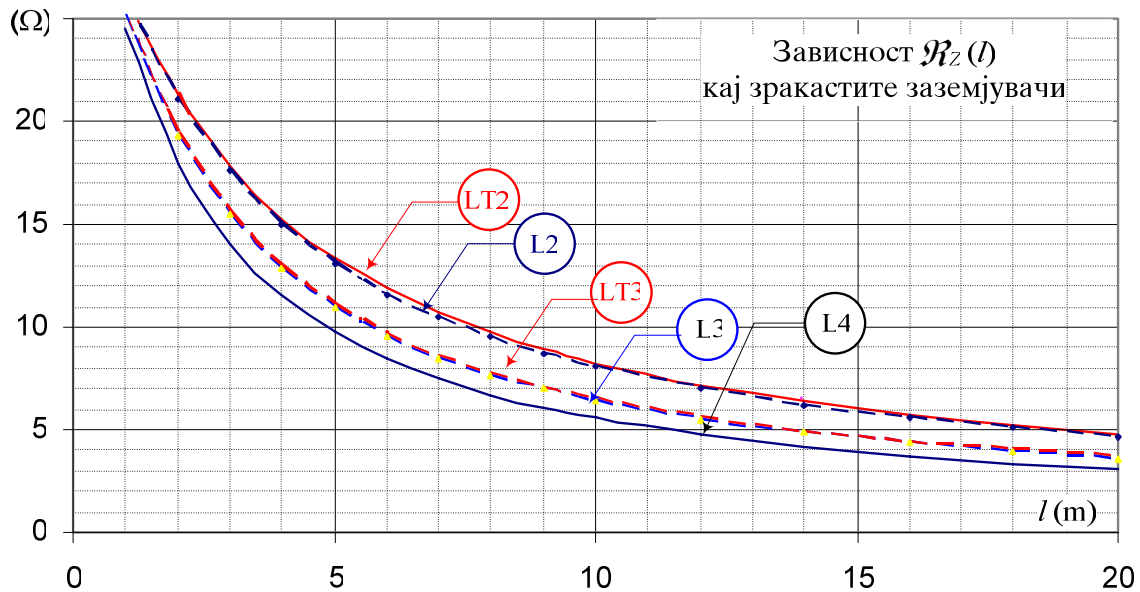
Зракасти заземјувачи

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 $l_s = 2 \text{ m}$.

Табела 5.3. Основни карактеристики на типските зракасти заземјувачи

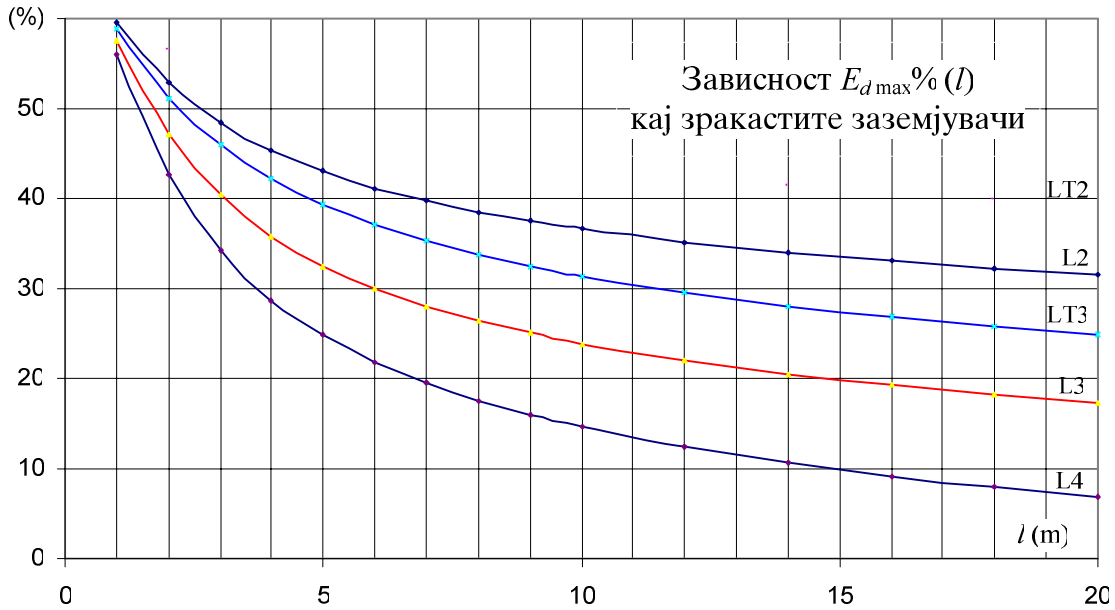
l (m)	тип L2	тип LT2	тип L3	тип LT3	тип L4
1	25.997	26.077	25.191	25.242	24.573
2	21.113	21.311	19.275	19.384	18.031
3	17.589	17.838	15.433	15.557	14.078
4	15.005	15.268	12.811	12.936	11.502
5	13.078	13.338	10.950	11.068	9.724
6	11.596	11.845	9.569	9.679	8.430
7	10.426	10.663	8.507	8.609	7.449
8	9.480	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

Во табелата 5.3 е прикажана зависноста на константата на отпорноста на распростирање $\mathcal{R}(l)$ за споменатите типови заземјувачи. На сликата 5.20а е прикажана во графичка форма истата таа зависност во услови на хомогено тло со $\rho = 100 \Omega\text{m}$.



Слика 5.20а. Зависност на $\mathcal{R}(\Omega)$ кај зракасти заземјувачи од должината на нивните краци l (m)

На сликата 5.20б е прикажана во зависноста на најголемата разлика на допир $E_{d,\max}\%$ од должината на краците l кај разгледуваните типски заземјувачи. Најголемите потенцијални разлики на чекор $E_{c,\max}\%$ не се прикажани бидејќи тие се помали од соодветните вредности на разликите на допир $E_{d,\max}\%$.



Слика 5.206. Зависност на $E_{d,max}\% (l)$ кај зракасти заземјувачи од должината на краците l (m)

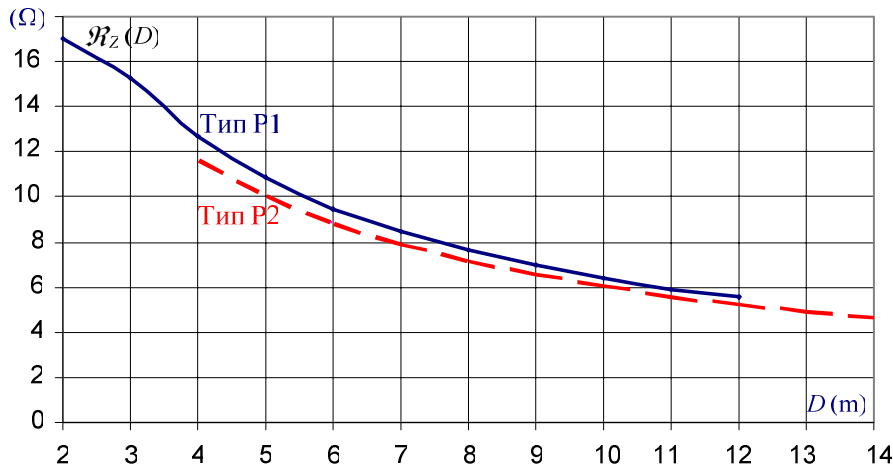
Прстенести заземјувачи

Во табелата 5.4 се прикажани основните карактеристики на прстенестите заземјувачи од типот P1 (заземјувачи со еден кружен прстен, според сл. 5.9) и типот P2 (два кружни прстена, според сл. 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

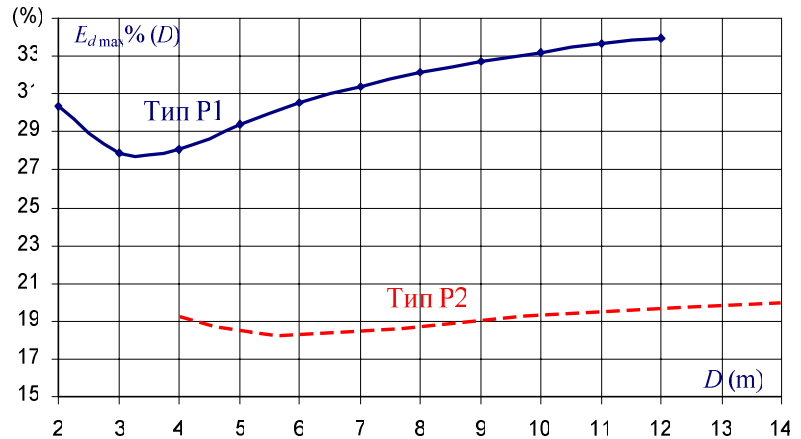
D (m)	заземјувач тип P1			заземјувач тип P2		
	\mathcal{R}_z (Ω)	$E_{d,max}\%$ (%)	$E_{c,max}\%$ (%)	\mathcal{R}_z (Ω)	$E_{d,max}\%$ (%)	$E_{c,max}\%$ (%)
2	16.985	30.3	26.7			
3	15.274	27.8	24.3			
4	12.687	28.1	22.4	11.644	19.1	19.3
5	10.852	29.4	22.6	10.040	18.4	18.4
6	9.494	30.5	22.8	8.831	18.4	18.4
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 5.21а е прикажана зависноста на отпорноста на распростирање R_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.



Слика 5.21а. Зависност $R_z(D)$ кај прстенести заземјувачи со еден (P1) и два (P2) прстена

На сликата 5.21б е прикажана во зависноста на најголемата разлика на допир $E_{d,max}\%$ од пречникот D ($D = D_1$) на првиот (кај заземјувачите тип 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 5.21б. Зависност $E_{d,max}\%(D)$ кај прстенести заземјувачи

Комбинирани прстенести-зракасти заземјувачи

Од дијаграмите прикажани на сликите 5.21а и 5.21б 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 комбинираните заземјувачи од типот K1L2 односно K1L4 (слика 5.11) ќе ги постигнеме истите ефекти. Тоа била идејата од воведувањето на овој тип заземјувачи [19].

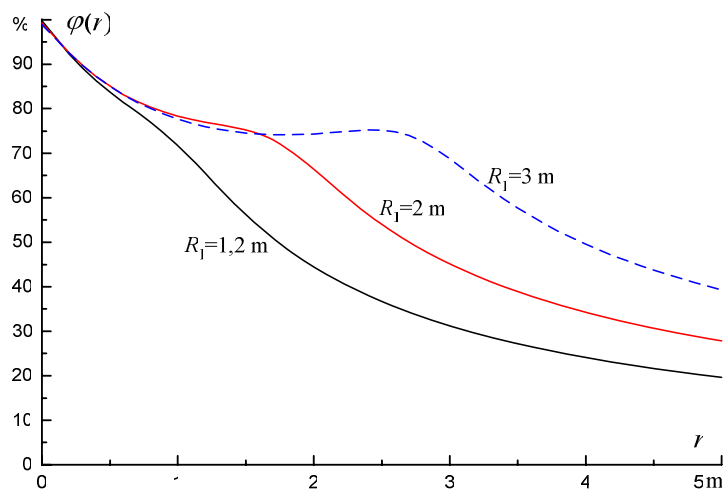
Основните карактеристики на овие заземјувачи се проучувани многу детално во [19]. Во табелите 5.5 и 5.6 се прикажани некои од нив. Тие се однесуваат на следните услови: тло – хомогено, $\rho = 100 \Omega\text{m}$; спроводници (електроди): валчесто поцинкувано железо $\Phi 10''$ ($d = 10 \text{ mm}$); 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 К1

Заз. тип К1	R_Z (Ω)	E_d (%)	E_c (%)	Заз. тип К1L2 \times l	R_Z (Ω)	E_d (%)	E_c (%)	Заз. тип К1L4 \times l	R_Z (Ω)	E_d (%)	E_c (%)
$R_1=1,2$ m	15,57	28,7	28,4	$l=1$ m	/	/	/	$l=1$ m	/	/	/
$R_1=1,4$ m	14,77	25,1	26,3	$l=2$ m	13,43	24,0	27,0	$l=2$ m	11,81	20,0	23,6
$R_1=1,6$ m	13,72	23,6	24,9	$l=3$ m	12,10	22,5	26,1	$l=3$ m	10,09	17,4	21,1
$R_1=1,8$ m	12,80	23,3	23,8	$l=4$ m	10,96	21,6	25,3	$l=4$ m	8,77	15,6	19,3
$R_1=2,0$ m	11,98	23,6	22,9	$l=5$ m	10,00	20,9	24,6	$l=5$ m	7,76	14,3	17,9
$R_1=2,2$ m	11,23	24,0	22,6	$l=6$ m	9,19	20,2	24,0	$l=6$ m	6,95	13,2	16,7
$R_1=2,4$ m	10,60	24,5	22,6	$l=7$ m	8,49	19,7	23,5	$l=7$ m	6,30	12,3	15,8
$R_1=2,6$ m	10,03	25,0	22,6	$l=8$ m	7,90	19,3	23,0	$l=8$ m	5,76	11,6	15,0
$R_1=2,8$ m	9,52	25,4	22,6	$l=9$ m	7,38	18,9	22,6	$l=9$ m	5,31	11,0	14,3
$R_1=3,0$ m	9,06	25,8	22,7	$l=10$ m	6,93	18,5	22,2	$l=10$ m	4,92	10,4	13,8

Табела 5.6. Карактеристики на двоконтурните комбинирани заземјувачи од фамилијата К2

Заз. тип К2	R_Z (Ω)	E_d (%)	E_c (%)	Заз. тип К2L2 \times l	R_Z (Ω)	E_d (%)	E_c (%)	Заз. тип К2L4 \times l	R_Z (Ω)	E_d (%)	E_c (%)
$R_2=2,2$ m	10,50	14,4	20,4	$l=1$ m	/	/	/	$l=1$ m	/	/	/
$R_2=2,7$ m	9,18	14,1	18,1	$l=2$ m	9,49	12,9	19,8	$l=2$ m	8,71	11,6	18,1
$R_2=3,2$ m	8,16	14,3	16,8	$l=3$ m	8,88	12,4	19,3	$l=3$ m	7,81	10,7	16,8
$R_2=3,7$ m	7,34	14,5	16,0	$l=4$ m	8,30	12,0	18,9	$l=4$ m	7,04	9,3	15,6
$R_2=4,2$ m	6,68	14,7	15,9	$l=5$ m	7,78	11,6	18,6	$l=5$ m	6,39	9,3	14,7
$R_2=4,7$ m	6,14	14,9	15,8	$l=6$ m	7,31	11,3	18,2	$l=6$ m	5,85	8,8	13,9
$R_2=5,2$ m	5,68	15,0	15,8	$l=7$ m	6,88	11,0	17,9	$l=7$ m	5,39	8,3	13,3
$R_2=5,7$ m	5,29	15,2	15,8	$l=8$ m	6,50	10,8	17,6	$l=8$ m	5,00	8,0	12,7
$R_2=6,2$ m	4,96	15,3	15,8	$l=9$ m	6,16	10,6	17,3	$l=9$ m	4,66	7,6	12,2
$R_2=6,7$ m	4,66	15,5	15,9	$l=10$ m	5,86	10,4	17,1	$l=10$ m	4,36	7,2	11,8



Слика 5.22. Распределба на потенцијалите по површината од земјата за заземјувачите од типот К1 со различни димензии на контурата

На сликата 5.22 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÷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.

Фреквентни хистограми

Анализите кои 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 нпр. кај зракастиот заземјувач LT2 и L2, потенцијалната разлика на допир ја надминува вредноста од 30%, што е најлош случај.

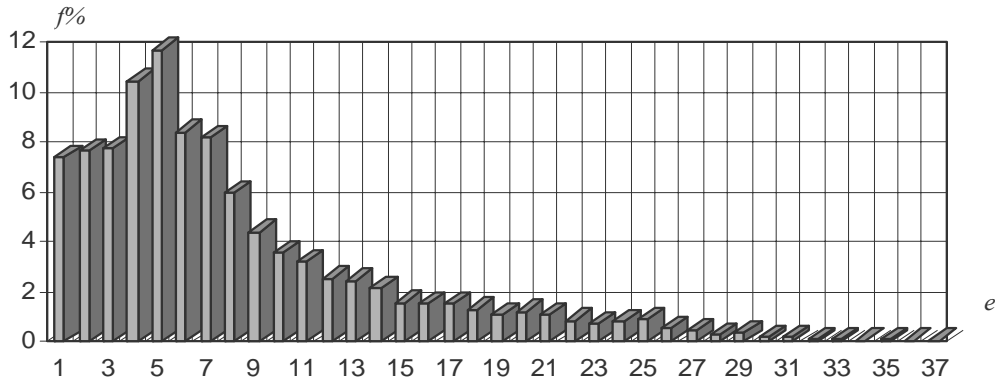
Кај прстенестите заземјувачи заради симетрија на заземјувачот максималните потенцијални разлики на допир се константни во сите правци со фреквенција на појавување 100 %. Тие, на пример, изнесуваат, во просек 31 % за едноконтурните заземјувачи од типот P1, односно 19 % за двоконтурните заземјувачи од 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 и 5.21 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 (ФХ). Последниве, пак, се добиваат со симулацијата монте карло (MonteCarlo) 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].

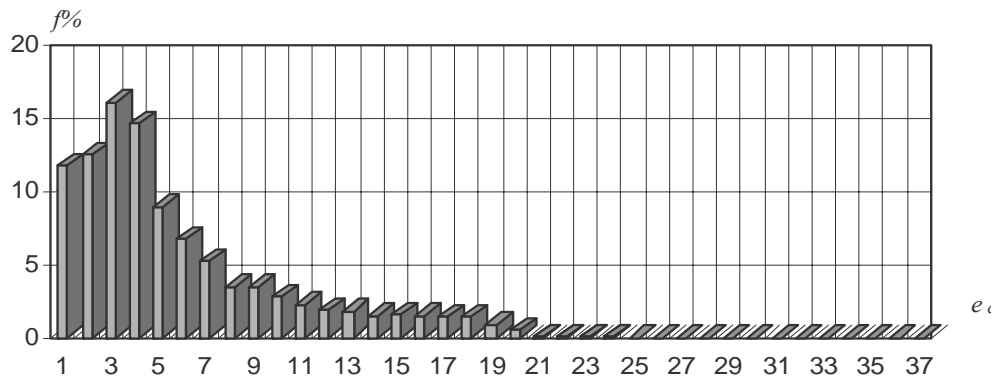
Фреквентниот хистограм на еден заземјувач дава многу поцелосна слика за неговите перформанси. Од него се отчитува не само максималната вредност $E_{d,max}\%$ односно $E_{c,max}\%$, на потенцијалните разлики на допир и чекор туку се оценува со колкава веројатност ќе се појавува некоја од вредностите на $E_d\%$ односно $E_c\%$.

За илустрација, на сликите 5.23а и 5.23б се прикажани фреквентните хистограми на потенцијалните разлики на чекор кај прстенести заземјувачи од типот P1×1.5 ($R1 = 1,5$ m) и P2×1.5 ($R1 = 1,5$ m и $R2 = 2,5$ 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 5.23а. Фреквентни хистограми на потенцијалните разлики на чекор E_c кај прстенест заземјувач, тип P1x1.5



Слика 5.23б. Фреквентни хистограми на потенцијалните разлики на чекор $E_c\%$ кај прстенест заземјувач, тип P2x1.5

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 \mathcal{R}_Z , целосно го опишуваат самиот заземјувач. На овој начин во табела 5.7 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 5.7. Основни карактеристики на заземјувачите тип А 6.0 и тип В 6.0

Заземјувач тип	Константа \mathcal{R}_Z (Ω)	Потенцијална разлика на допир, E_d (%)			Потенцијална разлика на чекор, E_c (%)		
		max	med	min	max	med	min
А 6.0	4,583	24,23	15,835	12,14	17	2,84	0
В 6.0	3,904	13,47	9,357	7,08	13	2,62	0

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 (сл. 5.10 и сл. 5.12). Околу секоја стопа се изведуваат по два правоагли прстена (слика 5.11) и на тој начин се добива основната конфигурација на заземјувачот, означена како заземјувач тип А. Кога условите за безбедност тоа го бараат (населено место, близина на пат и слично), тогаш на

конфигурацијата А, околу сите четири стопи, се додава уште една правоаголна контура (слика 5.13) 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 фамилијата “В”, прикажани во табелите 5.8а и 5.8б 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 5.8а и 5.8б 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.

³ Во 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 метри. 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 (сл. 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 (сл. 5.19).

Основните карактеристики на разгледуваните типски заземјувачи се прикажани во табелите 5.4.а и 5.4.б. Во нив се прикажани следните величини: отпорноста на распространување на заземјувачот \mathcal{R}_Z (Ω) 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 др.

Табела 5.8.а. Карактеристики на заземјувачите од фамилијата "А"

Реден број	Заземјувач тип	\mathcal{R}_Z (Ω)	Одведување од лентите I_L (%)	Одведување од стопите I_S (%)	Вкупна. должина L_Σ (m)	Вкупно ископ, Q (m ³)	Цена C (EUR)
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
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 5.8.б. Карактеристики на заземјувачите од фамилијата “В”

Реден број	Заземјувач тип	R_Z (Ω)	Одведување од лентите I_L (%)	Одведување од стопите I_S (%)	Вкупна должина L_Σ (m)	Вкупно ископ, Q (m ³)	Цена C (EUR)
1	В	5,97	/	70,8	32	10,2	200
2	В210	4,70	38,6	44,8	56	17,3	285
3	В215	4,01	51,4	35,6	66	20,5	370
4	В220	3,47	60,2	29,2	76	23,7	455
5	В225	3,06	66,2	24,2	86	26,9	540
6	В230	2,74	70,8	21,6	96	30,1	625
7	В235	2,48	74,4	18,8	106	33,4	710
8	В240	2,26	77,0	16,6	116	36,5	795
9	В405	5,19	34,6	48,4	60	18,6	310
10	В410	3,99	60,8	29,8	80	25,0	480
11	В415	3,18	73,6	20,4	100	31,4	650
12	В420	2,62	81,0	14,8	120	37,8	820
13	В425	2,24	85,4	11,0	140	44,2	990
14	В430	1,95	88,6	8,5	160	50,6	1160
15	В435	1,73	90,6	7,2	180	57,0	1325
16	В440	1,56	92,2	6,2	200	63,4	1600

5.5. 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 отпорот на распространување на заземјувачот мерен 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 $\alpha \approx 1$, т.е. $R_i \approx R_Z$. Но кај пространите заземјувачи, особено оние со долги хоризонтални зраци тоа не е можно.

5.5.1. 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: подолжна активна отпорност R_1 , подолжна индуктивност L_1 ,

подолжна капацитивност C_1 и подолжна 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 (изрази (4.9) ÷ (4.14)), со помош на следните изрази:

$$Z_C = 60 \cdot \ln \frac{2l}{d} \text{ (}\Omega\text{)}; \quad v = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon \cdot \mu}} = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_r \cdot \mu_r}} \cdot \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \cdot \mu_0}} = \frac{v_0}{\sqrt{\varepsilon_r \cdot \mu_r}}; \quad v_0 = 3 \cdot 10^8 \left(\frac{\text{m}}{\text{s}} \right) \quad (5.4)$$

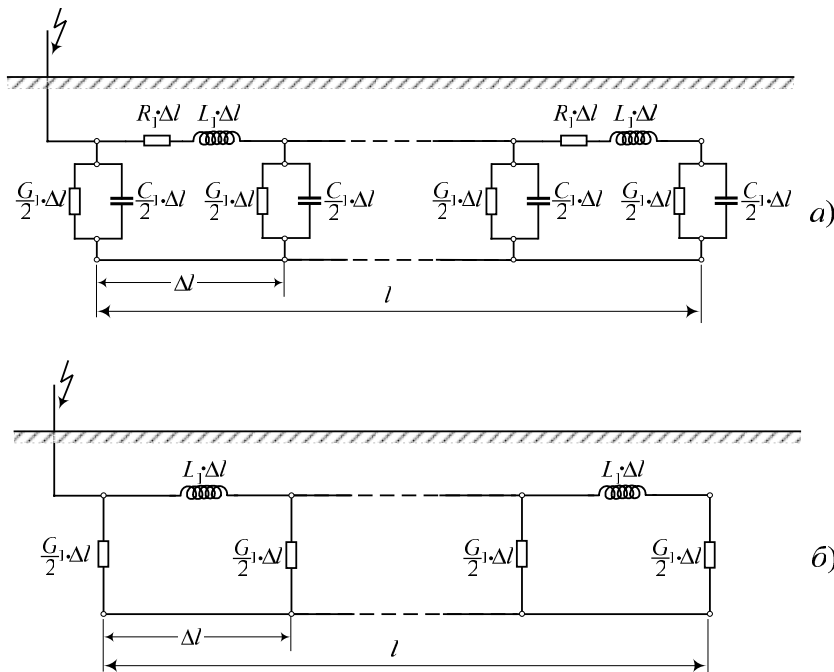
во кои l со d и се означени должината и пречникот на заземјувачот.

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. $\mu = \mu_0 \cdot \mu_r \approx \mu_0$ ($\mu_r = 1$), 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:

$$L_1 = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \ln \frac{2l}{d}; \quad C_1 = 2\pi \varepsilon_0 \varepsilon_r \cdot \ln^{-1} \frac{2l}{d}; \quad G_1 = \frac{\pi}{\rho} \cdot \ln^{-1} \frac{l}{\sqrt{d \cdot h}} \quad (5.5)$$

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 5.24а. Притоа секој од концентрираните четворополи заменува парче од заземјувачот со должина Δl .



Слика 5.24. Долг хоризонтален заземјувач и негова приближна претстава

Ако редната отпорност $R_1 \cdot \Delta l$ како и попречната капацитивност $C_1 \Delta l / 2$ ги испуштиме од шемата на сл. 5.24а, 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 5.24б. На тој начин процесите во долгите заземјувачи се решаваат на многу поедноставен начин без притоа да се изгуби во точноста во поголема мера.

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 истекнување 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 стрмнината S поголема, односно времето на чело на струјниот импулс T_c покосо, толку ќе биде потребно подолго време да измине за струјата да продри 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 подолжната 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_i 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. стрмнината $S = di/dt$). Нејзината приближна вредност може да се добие со помош на следниот израз:

$$R_i = \frac{1}{G_1 \cdot l} \quad \text{за } T_c > 1,49 \cdot G_1 \cdot l^2,$$

$$R_i = \frac{1,21}{\sqrt{G_1 \cdot T_c}} \quad \text{за } T_c \leq 1,49 \cdot G_1 \cdot l^2. \quad (5.7)$$

Значи големината на ударната отпорност на распространяње 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 распространяње 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 распространяње 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 распространяње за струја 50 Hz изнесува:

$$R_Z = \frac{\rho}{\pi \cdot l} \cdot \ln \frac{l}{\sqrt{h \cdot d}} = \frac{100}{\pi \cdot 10} \cdot \ln \frac{10}{\sqrt{0,7 \cdot 0,02165}} = 14 \Omega.$$

$$(d = 2 \cdot (30 + 4) / \pi = 68 / \pi = 21,65 \text{ mm} = 0,02165 \text{ m})$$

Единичната одводност на заземјувачот G_1 и единичната индуктивност L_1 ќе бидат:

$$G_1 = \frac{1}{R_Z \cdot l} = \frac{1}{14 \cdot 10} = 0,007144 \frac{\text{S}}{\text{m}},$$

$$L_1 = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \ln \frac{2l}{d} = \frac{4\pi \cdot 10^{-7}}{2\pi} \cdot \ln \frac{2 \cdot 10}{21,65 \cdot 10^{-3}} = 1,453 \frac{\mu\text{H}}{\text{m}}.$$

Активната должина на заземјувачот l_a за овој струен импулс ќе биде:

$$l_a = \sqrt{\frac{T_c}{G_1 \cdot L_1}} = \sqrt{\frac{1,2}{0,007144 \cdot 1,453}} = 10,75 \text{ m} \approx l.$$

Бидејќи е $1,49 \cdot G_1 \cdot l^2 = 1,064 < T_c$, за импулсната отпорност на распространяње 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 $l = 20$ m ќе имаме:

$$R_Z = \frac{\rho}{\pi \cdot l} \cdot \ln \frac{l}{\sqrt{h \cdot d}} = \frac{100}{\pi \cdot 20} \cdot \ln \frac{20}{\sqrt{0,7 \cdot 0,02165}} = 8,1 \Omega.$$

$$G_1 = \frac{1}{R_Z \cdot l} = \frac{1}{8,1 \cdot 20} = 0,006171 \frac{\text{S}}{\text{m}}$$

$$L_1 = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \ln \frac{2l}{d} = \frac{4\pi \cdot 10^{-7}}{2\pi} \cdot \ln \frac{2 \cdot 20}{21,65 \cdot 10^{-3}} = 1,701 \frac{\mu\text{H}}{\text{m}}$$

$$l_a = \sqrt{\frac{T_c}{G_1 \cdot L_1}} = \sqrt{\frac{1,2}{0,006171 \cdot 1,701}} = 10,7 \text{ m} < l.$$

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 т.н. активна должина ($l > l_a$) неговата импулсна отпорност R_i ќе биде поголема од отпорноста за наизменична струја R_Z за $\alpha = 1,75$ пати. Значи ударниот коефициент во случајов ќе изнесува:

$$\alpha = 1,75.$$

Амплитудата на напонот на заземјувачот U_M во овој случај ќе биде:

$$U_M = R_i \cdot I_M = 14 \cdot 25 = 350 \text{ kV},$$

а тоа е истата вредност што се постигнува кај претходниот заземјувач со должина $l = 10$ 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. Заземјувач во форма на трикрака ѕвезда, составен од три поцинкувани челични ленти FeZn 30x4 ($n = 3$), секоја со должина $l = 20$ m, е закопан на длабочина $h = 0,7$ 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:

- 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 50 Hz, изнесува (видете ја задачата бр. 5.1):

$$R_Z = \frac{\rho}{2\pi L_\Sigma} \cdot \left(\ln \frac{L_\Sigma^2}{d \cdot h} + A_k \right); \quad n = 3; \quad L_\Sigma = n \cdot l = 3 \cdot 20 = 60 \text{ m}; \quad A_k = 0,87,$$

$$R_Z = \frac{200}{2\pi \cdot 60} \cdot \left(\ln \frac{60^2}{0,022 \cdot 0,7} + 0,87 \right) = 7,028 \Omega.$$

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:

$$\eta = \frac{R_{1l}}{n \cdot R_Z} = \frac{16,204}{3 \cdot 7,028} = 0,768.$$

– Пресметка на импулсната отпорност на заземјувачот

Импулсната отпорност на распростирање на еден крак од заземјувачот R_{1i} ќе се добие со напдно истата постапка како и во претходниот пример. На тој начин ќе добиеме:

$$G_1 = 0,00386 \text{ S/m}; \quad L_1 = 1,562 \mu\text{H/km}; \quad l_a = 15,8 \text{ m} < l = 20 \text{ m}.$$

$$R_{1i} = \frac{1,21}{\sqrt{G_1 \cdot T_c}} = \frac{1,21}{\sqrt{0,00386 \cdot 1,2}} = 19,885 \Omega \approx 1,23 \cdot R_{1l} \Rightarrow \alpha_1 = 1,23.$$

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 5.3. Колкави ќе бидат отпорностите на распростирање R_Z , R_i и импулсниот коефициент α на заземјувачот во форма на трикрака ѕвезда од примерот 5.2 ($n=3$; $l=20 \text{ m}$; $h=0,7 \text{ m}$) 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.

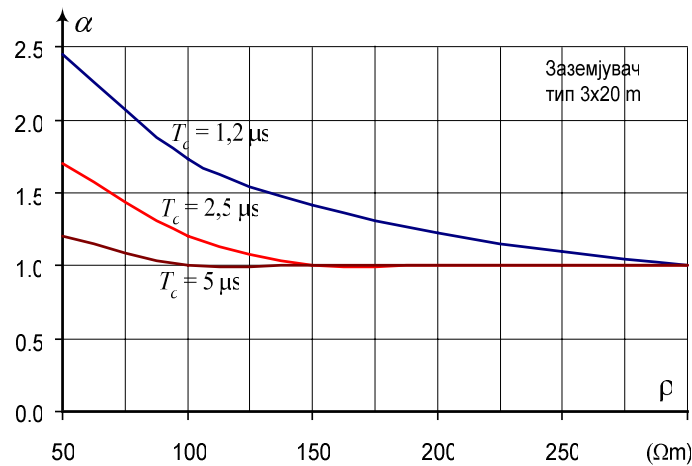
Решение:

- Пресметка на конвенционалната отпорност на заземјувачот

Со постапка идентична на онаа од примерот 5.2 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 табелата 1 и на сликата 1.

Табела 1. Зависност на R_Z , R_i и α на заземјувач тип L3 во форма на трикрака ѕвезда (3x20 m)

ρ (Ωm)	$T_c = 1,2 \mu\text{s}$				$T_c = 2,5 \mu\text{s}$				$T_c = 5 \mu\text{s}$			
	l_a (m)	R_Z (Ω)	R_i (Ω)	α /	l_a (m)	R_Z (Ω)	R_i (Ω)	α /	l_a (m)	R_Z (Ω)	R_i (Ω)	α /
50	8,0	1,757	4,313	2,454	11,6	1,757	2,988	1,700	16,4	1,757	2,113	1,202
100	10,7	3,514	6,099	1,735	18,4	3,514	4,225	1,202	23,2	3,514	3,514	1,000
150	13,9	5,271	7,470	1,417	20,1	5,271	5,271	1,000	28,4	5,271	5,271	1,000
200	16,1	7,028	8,625	1,227	23,2	7,028	7,028	1,000	32,8	7,028	7,028	1,000
250	18,0	8,786	9,643	1,098	26,0	8,786	8,786	1,000	36,7	8,786	8,786	1,000
300	19,7	10,54	10,56	1,001	28,4	10,54	10,54	1,000	40,2	10,54	10,54	1,000
350	21,3	12,30	12,30	1,000	30,7	12,30	12,30	1,000	43,4	12,30	12,30	1,000
400	22,7	14,06	14,06	1,000	32,8	14,58	14,58	1,000	46,4	14,58	14,58	1,000
450	24,1	15,81	15,81	1,000	34,8	15,81	15,81	1,000	49,3	15,81	15,81	1,000
500	25,4	17,57	17,57	1,000	36,7	17,57	17,57	1,000	51,9	17,57	17,57	1,000



Слика 1 Зависност на импулсниот коефициент $\alpha = f(\rho, T_c)$



5.5.2. Јонизација и електрични празнења во тлото

Од претходниот пример се гледа дека ударните ефекти на струјата 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. Обрат-

но, 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 упрости 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.

5.5.3. 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 5.9) 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 5.9 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 општиот облик (5.8) и се дадени со следните изрази:

$$\alpha = a \cdot \rho^{-p} \cdot (b + \sqrt{l}) \cdot (c - e^{-d \cdot I_M^q}) \quad \text{општ модел} \quad (5.8)$$

$$\alpha = 0.74 \cdot \rho^{-0.4} \cdot (7.0 + \sqrt{l}) \cdot (1.56 - e^{-3.0 \cdot I_M^{0.4}}) \quad \text{за типот } a \quad (5.9)$$

$$\alpha = 2.94 \cdot \rho^{-0.5} \cdot (6.0 + \sqrt{l}) \cdot (1.23 - e^{-2.0 \cdot I_M^{0.3}}) \quad \text{за типот } b \quad (5.10)$$

$$\alpha = 1.36 \cdot \rho^{-0.4} \cdot (1.3 + \sqrt{l}) \cdot (1.55 - e^{-4.0 \cdot I_M^{0.4}}) \quad \text{за типот } c \quad (5.11)$$

$$\alpha = 1.62 \cdot \rho^{-0.4} \cdot (5.0 + \sqrt{l}) \cdot (0.79 - e^{-2.3 \cdot I_M^{-0.2}}) \quad \text{за типот } d \quad (5.12)$$

$$\alpha = 1.16 \cdot \rho^{-0.4} \cdot (7.1 + \sqrt{l}) \cdot (0.78 - e^{-2.3 \cdot I_M^{-0.2}}) \quad \text{за типот } e \quad (5.13)$$

$$\alpha = 2.75 \cdot \rho^{-0.4} \cdot (1.8 + \sqrt{l}) \cdot (0.75 - e^{-1.5 \cdot I_M^{-0.2}}) \quad \text{за типот } f \quad (5.14)$$

Табела 5.9. 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 . ($S = 8 - 10$ m; $l = 0 - 50$ m)
b		Заземјувач за портални столбови, наменет за терени со низок специфична отпорност ρ . ($S = 0 - 15$ m)
c		Заземјувач за портални столбови, наменет за терени со висок специфичен отпор ρ . ($d = 10$ m; $l = 5 - 53$ m)
d		Заземјувач за обични, едностоечки бетонски и челично-реш. столбови. ($l = 5 - 100$ m)
e		Заземјувач за обични, едностоечки бетонски и челично-решетк. столбови.
f		Вертикален заземјувач за обични, едностоечки бетонски и челично-решеткасти столбови. ($l = 5 - 60$ 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):

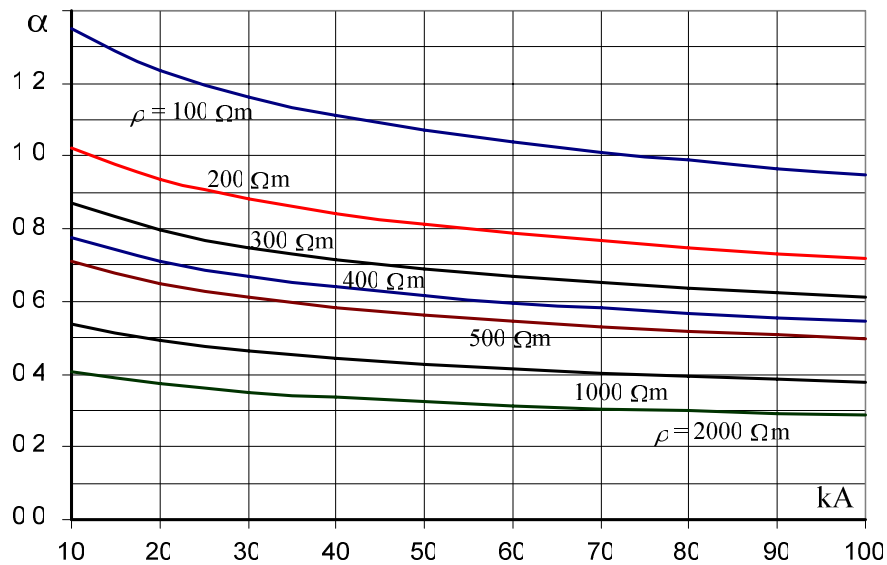
$$R_i = \alpha \cdot R_z.$$

Отпорноста на распространување 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 5.9, 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 (5.9) \dots (5.14), 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 5.9 се заклучува дека на заземјувачите од типот A2L и A4L најблиски по конфигурација се заземјувачите од типот e и c од табелата 5.9 – респективно. Со слично размислување се заклучува дека на заземјувачите тип B, B2L и B4L одговараат конфигурациите b , e и a .

За илустрација, во табелата 5.10 и на сликата 5.24 се прикажани некои вредности на импулсниот коефициент на заземјувач во форма на лента (тип d) со должина $l = 20$ m, пресметани според релацијата (5.12). Слично, во табелата 5.11 се прикажани некои вредности на импулсните коефициенти на заземјувачите тип A2L и B2L за должина на краците $l = 10$ m.



Слика 5.24. Импулсни коефициенти за хоризонтален заземјувач со должина $l = 20$ m

Табела 5.10. Табеларен приказ на зависноста $\alpha = f(I_M)$ на заземјувач во форма на лента со должина $l = 20$ m

I_M (kA)	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
$\rho = 100 \Omega m$	1.351	1.234	1.163	1.112	1.072	1.039	1.012	0.988	0.967	0.948
$\rho = 200 \Omega m$	1.024	0.935	0.881	0.842	0.812	0.788	0.767	0.749	0.733	0.718
$\rho = 300 \Omega m$	0.871	0.795	0.749	0.716	0.691	0.670	0.652	0.636	0.623	0.611
$\rho = 400 \Omega m$	0.776	0.709	0.668	0.638	0.616	0.597	0.581	0.567	0.555	0.544
$\rho = 500 \Omega m$	0.710	0.648	0.611	0.584	0.563	0.546	0.531	0.519	0.508	0.498
$\rho = 1000 \Omega m$	0.538	0.491	0.463	0.443	0.427	0.414	0.403	0.393	0.385	0.377
$\rho = 2000 \Omega m$	0.408	0.372	0.351	0.335	0.323	0.314	0.305	0.298	0.292	0.286

Табела 5.11. Импулсни коефициенти α на заземјувачите од типот А2×10 и В2×10

I_M (kA)	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
$\rho = 100 \Omega\text{m}$	1.060	0.966	0.909	0.868	0.836	0.810	0.788	0.769	0.753	0.738
$\rho = 500 \Omega\text{m}$	0.557	0.507	0.478	0.456	0.439	0.426	0.414	0.404	0.395	0.387
$\rho = 1000 \Omega\text{m}$	0.422	0.385	0.362	0.346	0.333	0.323	0.314	0.306	0.300	0.294
$\rho = 5000 \Omega\text{m}$	0.222	0.202	0.190	0.182	0.175	0.169	0.165	0.161	0.157	0.154

Пример 5.4. Се посматра 10 kV надземен вод со бетонски столбови и со потпорни изолатори тип PS 12 ($U_{\text{подн}} = 75 \text{ kV}$). Колкава ќе биде веројатноста за повратен прескок P_0 при удар на гром во столбот за случајот кога столбовите се заземјени со заземјувачи од типот L2×10 (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 L2×10 ги има следните карактеристики:

Отпорност на распространување: $R_Z = 8,043 \Omega \approx 8 \Omega$;

Мах. 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:

$$R_i = \alpha \cdot R_Z \approx 8 \Omega,$$

$$U_{\text{подн}} = 75 \text{ kV},$$

$$I_M = \frac{U_{\text{подн}}}{R_i} = \frac{75}{8} = 9,375 \text{ kA}$$

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 5.2 од која можеме да ја процените веројатноста $P = P(I \leq I_M)$:

$$P_0 = 1 - P = 1 - P(I \leq I_M).$$

Ударна струја I_M (kA)	5	10	15	20	30	40	50	60
Веројатност $P(I \leq I_M)$	0,14	0,40	0,62	0,79	0,91	0,95	0,98	0,99

Од табелата 5.2, со примена на постапката на линеарна интерполација, добиваме:

за $I_M = 5 \text{ kA}$ $P(I \leq I_M) = 0,14$ (14%);

за $I_M = 10 \text{ kA}$ $P(I \leq I_M) = 0,40$ (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 пресекок.

Условот (5.1) за најголемиот дозволен напон на столбот, според членот 80 од Правилникот, нема да биде задоволен бидејќи е:

$$U_Z = R_Z \cdot I_Z = 8 \cdot 20 = 160 \text{ V} . (U_Z > 125 \text{ V})$$

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:

$$E_{d.\max} = \frac{E_{d.\max} \%}{100} \cdot U_Z = \frac{37}{100} \cdot 160 = 59 \text{ V} (E_{d.\max} < 65 \text{ V})$$



Пример 5.5. Да се пресмета колкава треба да биде должината на краците $l = ?$ на заземјувачот тип L2×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 $I_0 = 15 \text{ kA}$.

Решение:

За да се постигне заштитно ниво на водот $I_0 = 15 \text{ kA}$, ќе биде потребно отпорноста на распространување на заземјувачите да биде:

$$R_Z = \frac{U_{Podn}}{I_0} = \frac{75}{15} = 5 \Omega .$$

Од табелата 4.3 ја отчитуваме бараната вредност на должината l на краците:

Табела 4.3. Зависност $\mathcal{R}(l)$ кај типските зракасти заземјувачи

l (m)	тип L2	тип LT2	тип L3	тип LT3	тип 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

$$l \approx 18 \text{ m}^*$$

(Забелешка: "Точната" вредност, добиена со линеарна интерполација, е $l = 18,5 \text{ m}$).

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 5.2, 62% од ударите нема да предизвикаат повратен прескок, а само 38% од нив ќе бидат опасни за далекуводот.



Пример 5.6. Да се реши случајот разгледуван во примерот 5.5 ако надземниот вод се изведе со потпорни изолатори од типот PS 24, наменети за 20 kV водови, чиј поднослив импулсен напон изнесува $U_{подн} = 125$ kV.

Решение:

Во овој случај ќе имаме:

$$I_0 = \frac{U_{подн}}{R_Z} = \frac{125}{8} = 15,63 \text{ kA}.$$

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:

$$P(I < I_0) = P(I < 15,63) = 0,64 \text{ (64\%);}$$

$$P_0 = P(I \geq I_0) = 1 - P(I < I_0) = 0,36 \text{ (36\%).}$$

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 5.5) 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 5.7. 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, 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:

$$R_Z = \frac{\rho}{\pi^2 \cdot D} \cdot \ln \frac{4 \cdot D}{\sqrt{h \cdot d}}. \quad (1)$$

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 (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:

$$D_k = \frac{\rho}{\pi^2 \cdot R_Z} \cdot \ln \frac{4 \cdot D_{k-1}}{\sqrt{h \cdot d}}; \quad k = 1, 2, \dots \quad (2)$$

која што произлегува од формулата (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:

$$D_0 = 1 \text{ m.}$$

Во случајот кога е $\rho = 100 \Omega\text{m}$, итеративниот процес на решавање би изгледал вака:

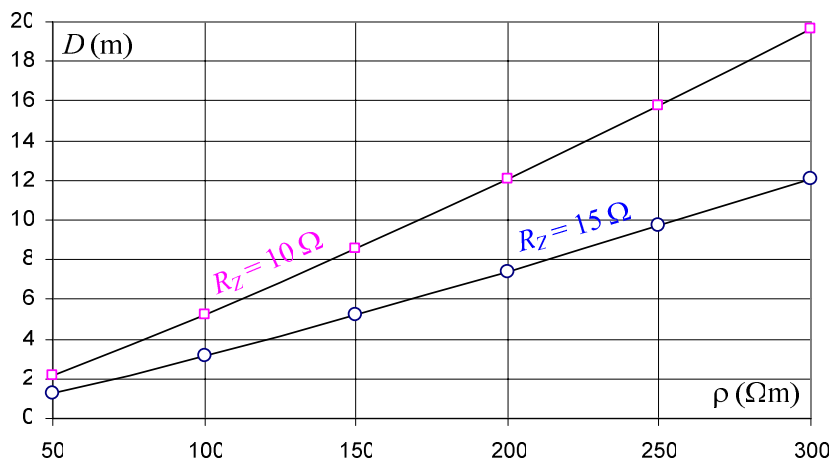
$$D_1 = \frac{\rho}{\pi^2 \cdot R_Z} \cdot \ln \frac{4 \cdot D_0}{\sqrt{h \cdot d}} = \frac{100}{\pi^2 \cdot 15} \cdot \ln \frac{4 \cdot 1}{\sqrt{0,7 \cdot 0,022}} = 2,35 \text{ m};$$

$$D_2 = \frac{\rho}{\pi^2 \cdot R_Z} \cdot \ln \frac{4 \cdot D_1}{\sqrt{h \cdot d}} = \frac{100}{\pi^2 \cdot 15} \cdot \ln \frac{4 \cdot 2,35}{\sqrt{0,7 \cdot 0,022}} = 2,92 \text{ m, итн.}$$

После само неколку итерации се добива бараното решение (заокружено на втора децимала):

$$D = 3,11 \text{ m.}$$

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 1 и на дијаграмот од сликата 1. На истата табела и слика е прикажан и случајот кога се бара да биде $R_Z = 10 \Omega$.



Слика 1. Графички приказ на зависноста $D = f(\rho)$

Табела 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



Пример 5.8. 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.

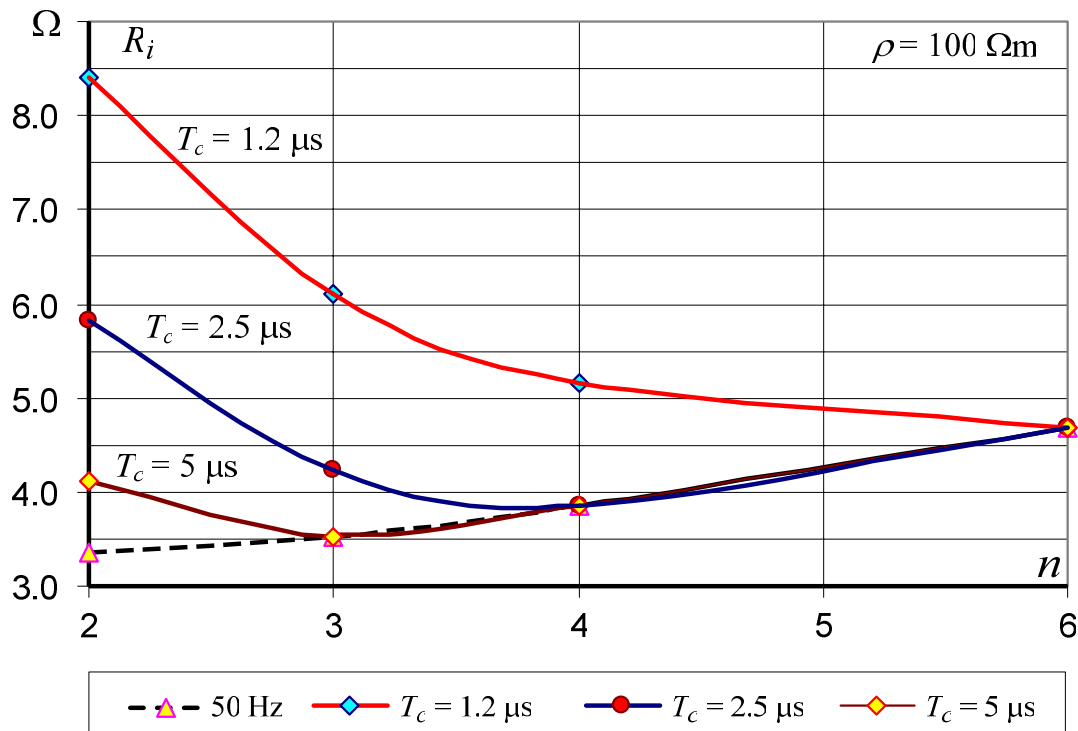
- а) да се утврди која од споменатите 4 конфигурации ќе има најмала импулсна отпорност.
 б) задачата да се повтори и за случајот кога челото на струјниот имулс има должина $T_c = 2,5 \mu\text{s}$ и $T_c = 5 \mu\text{s}$.

Решение:

На начин подобен на оној применет во примерот 5.2, со помош на релацијата (1) и табелата 1, 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 1. Истите резултати се графички прикажани и на дијаграмот од сликата 1.

Табела 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 . $T_c = 1,2 \mu\text{s}$

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 1. Графички приказ на зависноста $R_i = f(n)$ кај зракастите заземјувачи

Од резултатите прикажани во табелата 1 и сликата 1 се гледа дека ударниот ефект што се должи на присуството на индуктивноста на краците од заземјувачот, за стрмните импулси со време на челото $T_c = 1,2 \mu s$, се силно изразени. Во таквите случаи најповолна варијанта е свездата 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 свезда е 10 m.

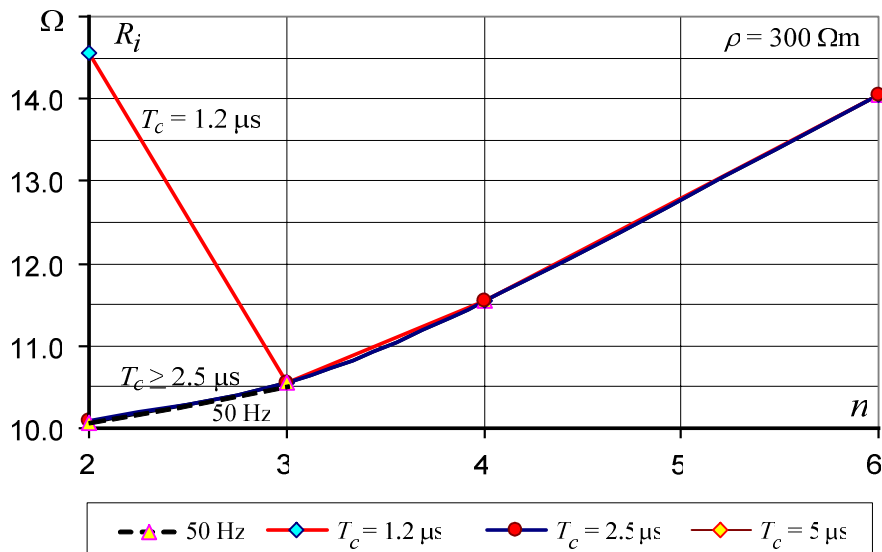
На сликата 1, покрај случајот кога е $T_c = 1,2 \mu s$, се прикажани и резултатите за зависноста $R_i(n)$ за струјни импулси со поголеми времиња на челото и тоа за 2,5 и за 5 μs . Од оваа слика гледаме дека ударните ефекти на простирање кај краците се сега, заради помалата стрмнина на струјата, помали, така што оптималното решение се добива за $n = 4$, кога се работи за чело $T_c = 2,5$ ($R_i = 3,848 \Omega$) односно $n = 3$, за струјните импулси со време на челото $T_c = 5 \mu s$ ($R_i = 3,514 \Omega$).

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 плото 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 $\rho = 300 \Omega m$, ќе ги добиеме резултатите прикажани на сликата 2. За почви со $\rho \geq 500 \Omega m$ ударните ефекти што се должат на присуството на индуктивноста на заземјувачите

скоро целосно изостануват 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 отпорниост на заземјувачот.



Слика 2. Зависност $R_i = f(n)$ кај зракастите заземјувачи кога е $\rho = 300 \Omega\text{m}$

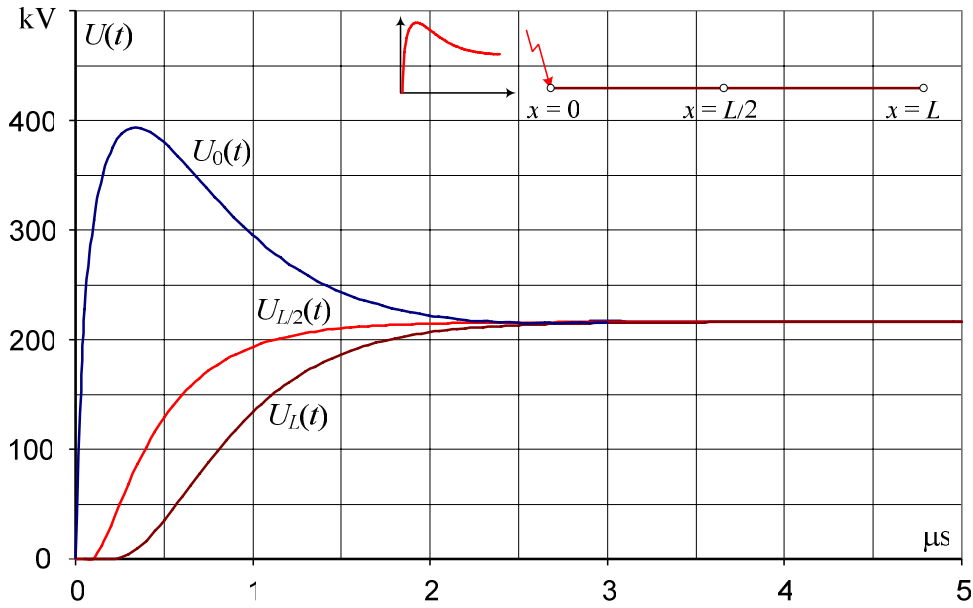


Пример 5.9. Со помош на програмата "ImpulsenOtpor.xls" да се изврши пресметка на временскиот тек на напонот на заземјувачот од примерот 5.2 (FeZn 30×4, $l = 20 \text{ m}$, $h = 0,7 \text{ m}$; $\rho = 100 \Omega\text{m}$) за случај кога импулсот на струјата на громот има темена вредност $I_M = 25 \text{ kA}$ а неговиот облик има параметри: а) 1,2/50; 2.5/50 и 5/0/50 μs. Колкави се вредностите на импулсниот коефициент α добиен на тој начин.

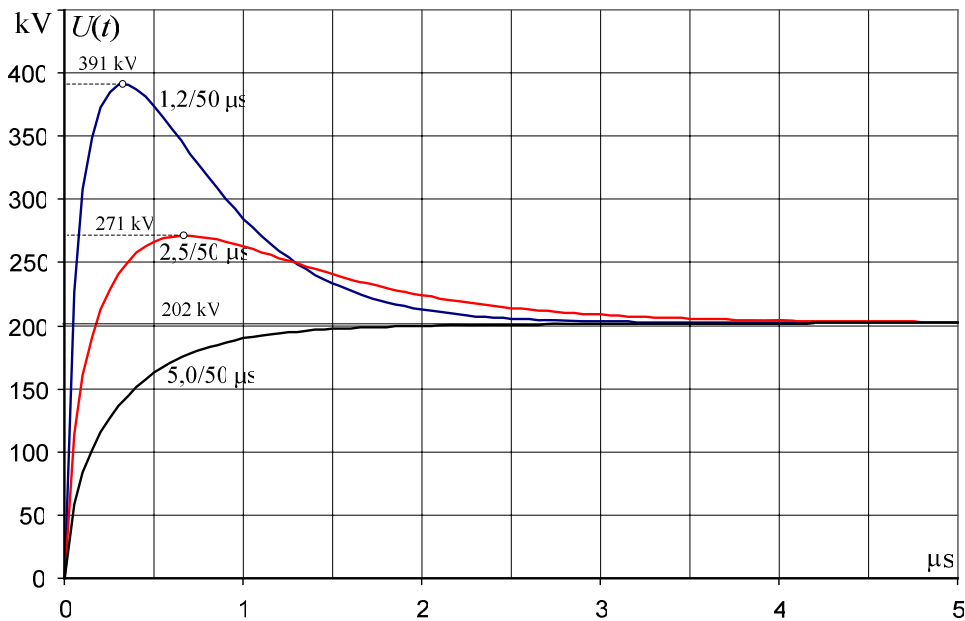
Решение:

Со помош на програмата е вршена симулација 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 $U_0(t) = U_Z(t)$ 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 1.

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 сл. 2.



Слика 1. Зависност на напонот $U(t)$ за заземјувач во форма на лента со должина $l = 20$ m во разни точки по неговата должина. $\rho = 100 \Omega\text{m}$. $T_c = 1,2 \mu\text{s}$.



Слика 2. Временски тек на напонот на заземјувачот $U_Z = f(t)$ за лента со должина $l = 20$ m и $\rho = 100 \Omega\text{m}$

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 распространување 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 $1,2/50 \mu\text{s}$: $R_{i(1,2/50)} = \frac{391}{25} = 15,64 \Omega$; $\alpha_{1,2/50} = \frac{15,64}{8,1} = 1,93$;

б) облик на струјниот импулс 2,5/50 μs : $R_{i(2.5/50)} = \frac{271}{25} = 10,84 \Omega$; $\alpha_{1.2/50} = \frac{10,84}{8,1} = 1,34$;

в) облик на струјниот импулс 5,0/50 μs : $R_{i(5.0/50)} = \frac{202}{25} = 8,1 \Omega$; $\alpha_{1.2/50} = \frac{8,1}{8,1} = 1,0$.



Задача бр. 5.1. Столбовите од 20 kV надземен вод, анализиран во примерот 5.5, 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: $\rho = 100, 300$ и $500 \Omega\text{m}$.

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 $R_Z = 15 \Omega$.

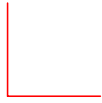
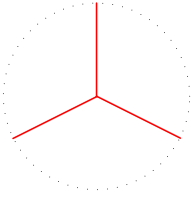
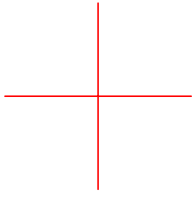
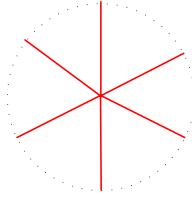
Задачата да се реши на два начина:

- со помош на табелата 5.3, применувајќи ја постапката на линеарна интерполација;
- аналитички, со помош на следната емпириска формула:

$$R_Z = \frac{\rho}{2\pi L_\Sigma} \cdot \left(\ln \frac{L_\Sigma^2}{d \cdot h} + A_k \right). \quad (1)$$

Емпирииската формула (1) е општа и важи за зракастите заземјувачи со 2, 3, 4 и 6 краци, во согласност со табелата 1. 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 ($k=4$) се добива $L_\Sigma = 4 \cdot l$.

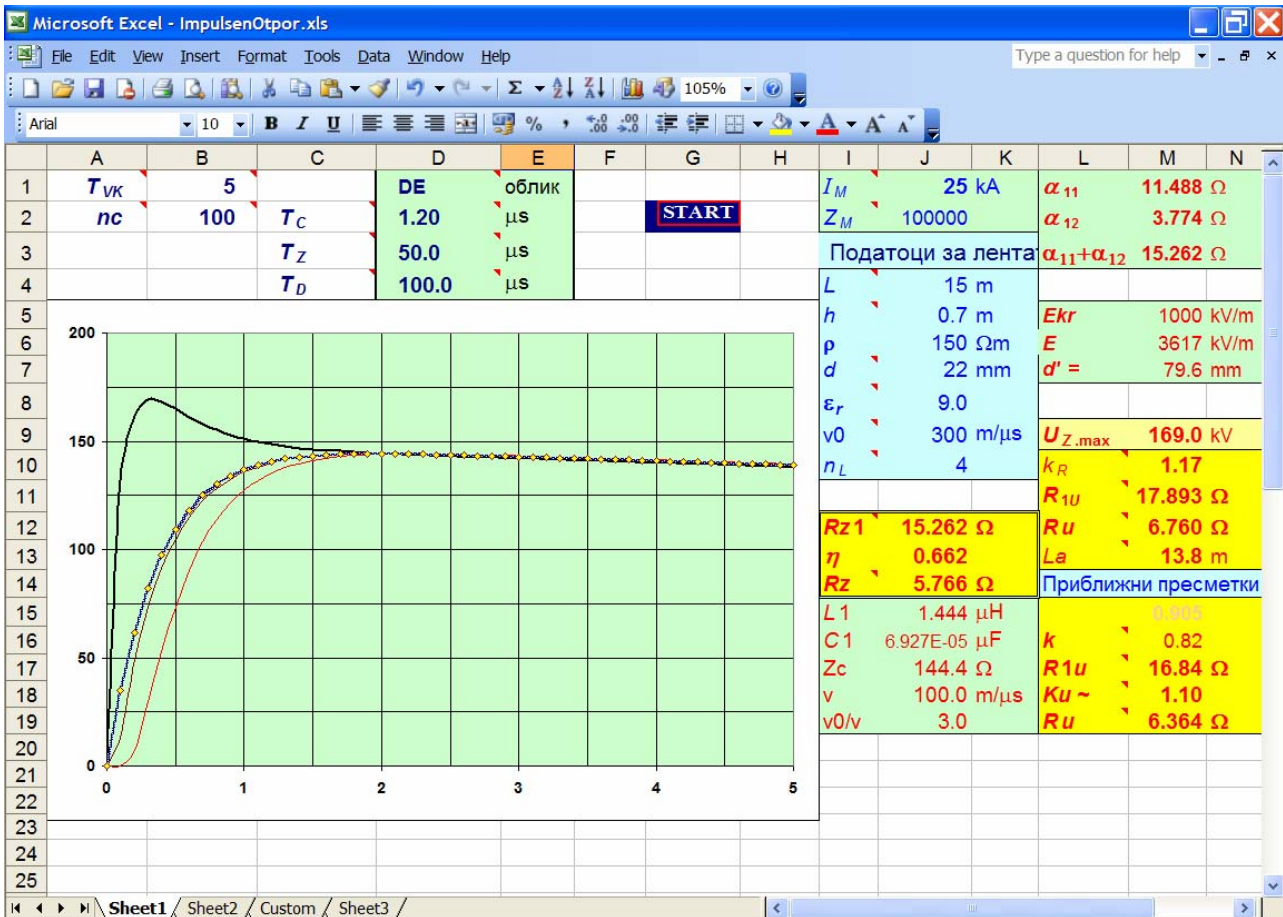
Табела 1. Зависност на коефициентот A_k од обликот на зракастиот заземјувач

<i>двокрака ѕвезда</i>	<i>трикрака ѕвезда</i>	<i>четирикрака ѕвезда</i>	<i>шестокрака ѕвезда</i>
			
$A_k = 0,26$	$A_k = 0,87$	$A_k = 2,13$	$A_k = 5,27$

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.

УПАТСТВО

за користење на програмата "ImpulsenOtpor.xls"



Слика 1. Изглед на првиот работен лист во којшто се внесуваат влезните податоци

Програмата "ImpulsenOtpor.xls" служи за пресметување на импулсната отпорност на зракасти заземјувачи од типот "L", "L2", "LT2", "L3", "LT3", "L4" и "L6" (опишани во точката 5.2) формирани од долги хоризонтални ленти кај кои се јавуваат ефектите на простирање на струјните и напонските бранови.

Пресметувањето на брановите преодни процеси кај овие заземјувачи се врши со истиот алгоритам којшто се применува и при пресметувањето на брановите процеси на водовите во ЕЕС, само што овде брановите се простираат во земјата наместо во воздухот.

На сликата 1 е прикажан изгледот на работниот лист "Sheet1" во којшто се внесуваат податоците неопходни за решавање на разгледуваниот проблем. За работата на оваа програма е потребно да се дадат следните податоци:

Легенда:

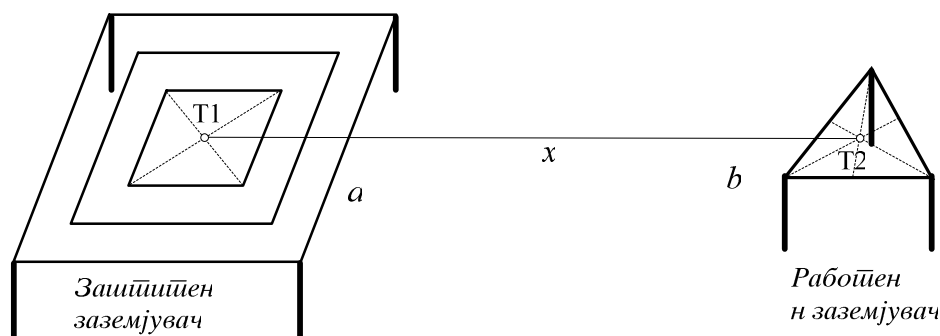
- T_{VK} (келија B1) – вкупно времетраење на посматрање на импулсниот преоден процес;
 n_c (келија B2) – чекор со којшто се врши печатење на резултатите за временскиот тек на напоните по должината н заземјувачот;
облик (LL, LE, DE, Custom) на струјниот импулс на громот (келија D1);
 T_C (келија D2) – вкупно времетраење на челото на струјниот импулс;
 T_Z (келија D3) – вкупно времетраење на грбот на струјниот импулс;
 T_D (келија D4) – вкупно времетраење на струјниот импулс;
 I_M (келија J1) – амплитуда на струјата громот;
 Z_M (келија J2) – импеданција на каналот на громот (Ω);
 L (келија J4) – должина на секој од краците на заземјувачот (m);
 h (келија J5) – длабочина на закопување на хоризонталните краци на заземјувачот (m);
 ρ (келија J6) – специфична отпорност на тлото во коешто е закопан заземјувачот (Ωm);
 d (келија J7) – еквивалентен пречник на секој од хориз. краци на заземјувачот (mm);
 ϵ_r (келија J8) – релативна диелектрична перимиабилност на почвата;
 v_0 (келија J9) – брзина на престоирање на брановите (светлината) во вакуум (m/ μs);
 n_L (келија J10) – вкупен број на хоризонталните краци од заземјувачот.
- Како резултат на пресметките се добиваат следните податоци:

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.



Сл. 6.1. Заштитен и работен заземјувач, галвански одвоени

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. 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 неут-

рална 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 (сл. 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.

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 Φ 2" (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.

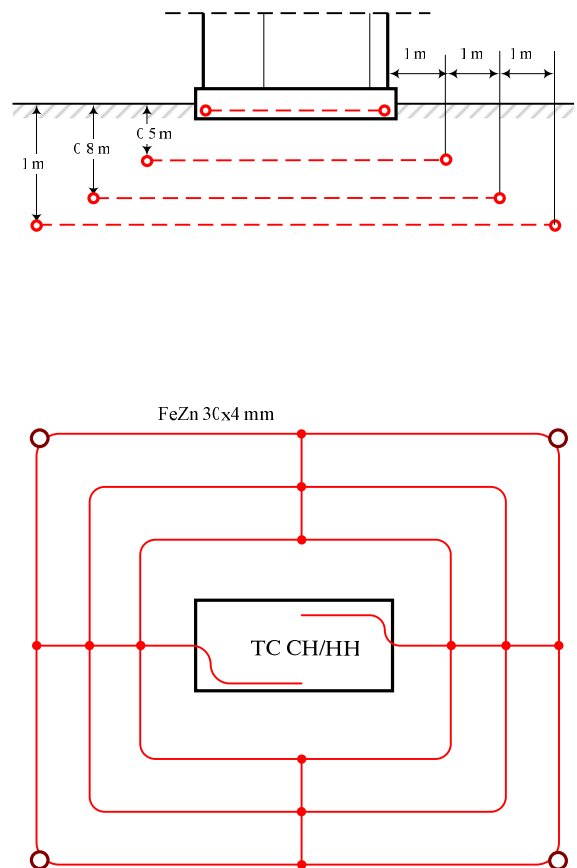
Според Препораката [11], заштитниот заземјувач на ТС СН/НН задоволува, (условите за безбедност се исполнети), ако за отпорноста на заземјувачот важи $R_z \leq 5 \Omega$.

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 6.2 е прикажана скицата на заштитниот заземјувач *тип 1*. Тој е составен од три правоаголни контури поставени на иста длабочина $h = 1$ 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 Φ2" од по 3 m во темињата на периферната контура (сл. 6.3).



Слика 6.2. Заштитен заземјувач на ТС 10/0,4, според Препораката ТП 7

Типот 3, (слика 6.4), е троконтурен заштитен заземјувач наменет за заземјување на столбна трансформаторска станица (СТС) со само еден трансформатор.

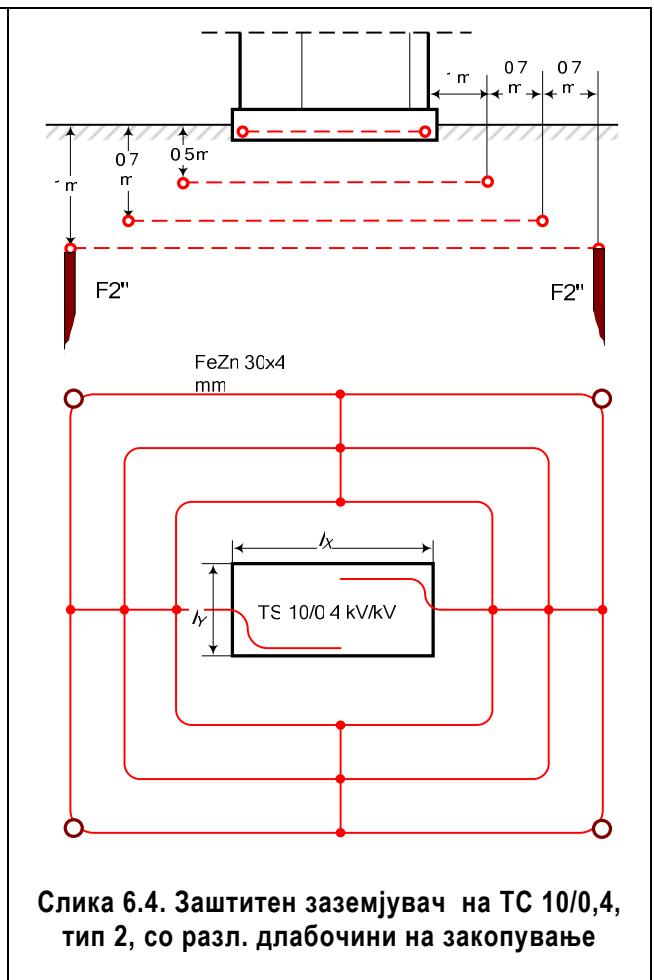
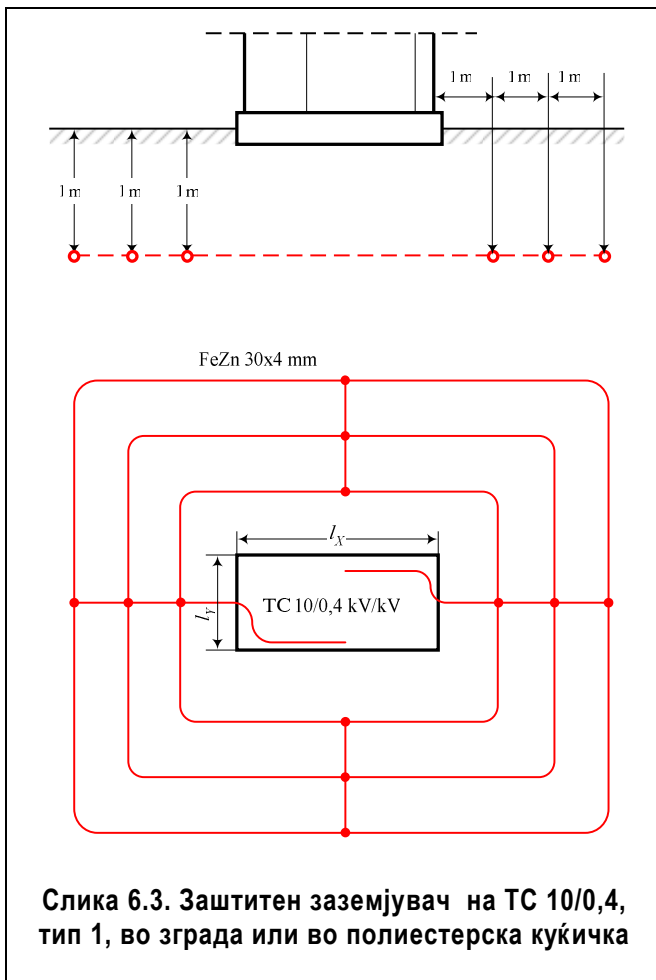
На сликата 6.5 е прикажана скица на еден троконтурен заштитен заземјувач за СТС, изведен во една селска дистрибутивна 10 kV мрежа.

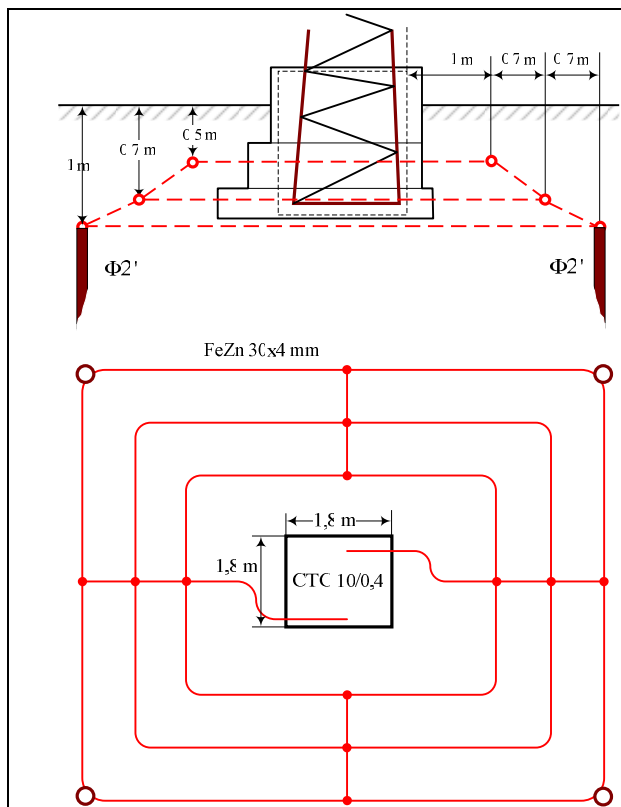
6.1.2. Основни карактеристики на некои од типските заштитните заземјувачи

Карактеристиките на заземјувачите од типот 1, 2 и 3 се анализирани на некои конкретни случаи, изложени во табелата 6.1. Пресметките се вршени со помош на програмата "ZASTITEN.xls". Пресметувани се: специфичната отпорност на распространување \mathcal{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 6.7, 6.8 и 6.9. Тие се општи бидејќи процентуалните вредности за $E_d\%$ и $E_c\%$ не зависат од специфичната отпорност на плото додека отпорноста R_Z на заштитниот заземјувач за други вредности на специфичната отпорност на плото ρ ($\rho \neq 100 \Omega\text{m}$) ќе биде:

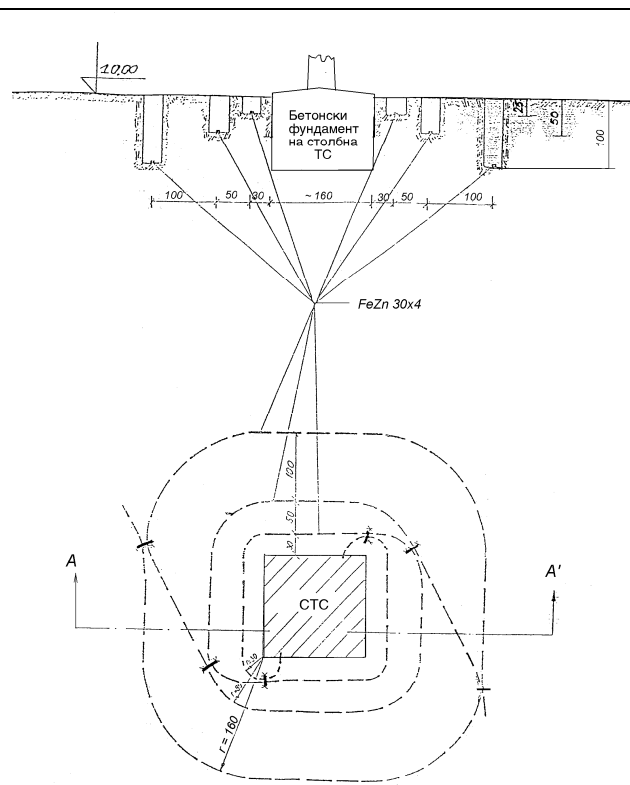
$$R_Z = \mathcal{R}_Z \cdot (\rho/100). \quad (6.1)$$

Вредностите $E_{d,max}$, $E_{d,med}$ и $E_{d,min}$ за 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 (Monte Carlo).





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.

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 6.1: Отпорност на распространување \mathcal{R}_Z на типските заштитни заземјувачи

Тип	\mathcal{R}_Z , (Ω) модиф. а)	\mathcal{R}_Z , (Ω) модиф. б)	\mathcal{R}_Z , (Ω) модиф. в)	Димензии $l_x \times l_y$ (m)	Опис на ТС СН/НН
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

Табела 6.2. Потенцијални разлики на допир (%) (максимална, просечна и минимална вредност)

	$E_{d,max}$	$E_{d,med}$	$E_{d,min}$	$E_{d,max}$	$E_{d,med}$	$E_{d,min}$	$E_{d,max}$	$E_{d,med}$	$E_{d,min}$
Тип		модиф.	а)		модиф.	б)		модиф.	в)
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)

	$E_{d,max}$	$E_{d,med}$	$E_{d,min}$	$E_{d,max}$	$E_{d,med}$	$E_{d,min}$	$E_{d,max}$	$E_{d,med}$	$E_{d,min}$
Тип		модиф.	а)		модиф.	б)		модиф.	в)
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

Легенда: 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 кај модификацијата а) сите типови се со додадени 4 вертикални сонди; кај модификацијата б) сите типови се без средната контура за обликување на потенцијалот и кај модификацијата 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 %.

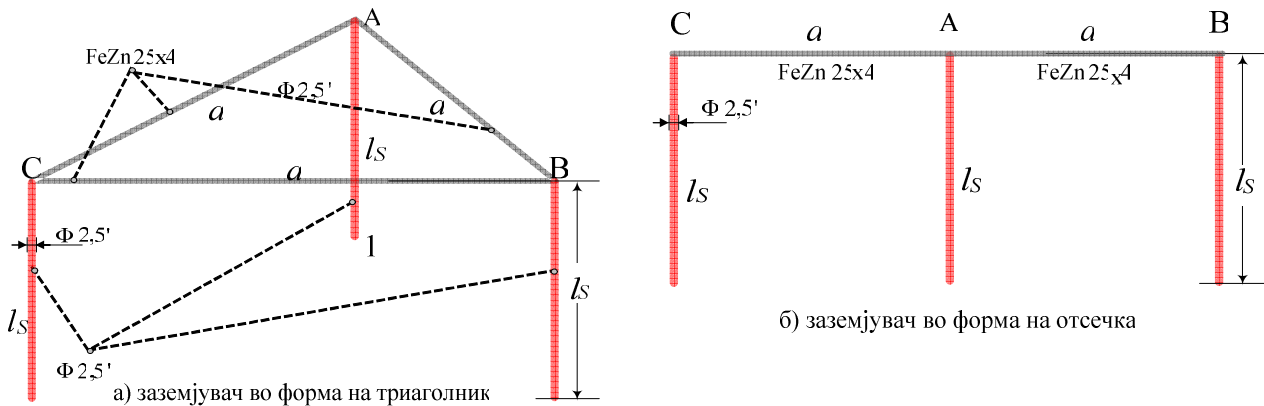
Присуството на средната контура во заземјувачот сосема малку влијае врз намалувањето (за помалку од 5%) на вредноста на отпорноста R_Z . Таа најмногу влијае врз обликувањето на потенцијалот во и околу ТС и ги смалува потенцијалните разлики на допир за повеќе од два пати.

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 свездиштето 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 (FeZn 30×4), а понекогаш и од бакарно јаже Cu 35 или Cu 50 mm², закопан на извесна длабочина h ($h = 0,7 \div 0,8$ m), и три вертикални сонди со должини $l_s = 2 \div 3$ m, од челични поцинкувани цевки $\Phi 2,5''$ ($\Phi 63,5$ 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 др.



Слика 6.7. Работен заземјувач на ТС СН/НН во форма на рамностран триаголник

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 безбедност, 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 инста-

лации 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 програмата "RABZAZ.xls" се вршени детални анализи на влијанието на формата и димензиите на работниот заземјувач врз вредноста на неговата отпорност на распространување R_{RZ} . Во табелата 6.3 како и на сликата 6.8 се прикажани резултатите од пресметките на специфичната отпорност \mathcal{R}_{RZ} на работниот заземјувач според скицата од сликата 6.7, поставен во хомогена средина со специфична отпорност $\rho = 100 \Omega\text{m}$. За вредности на специфичната отпорност на земјиштето $\rho \neq 100 \Omega\text{m}$, отпорноста на распространување на заземјувачот ќе биде:

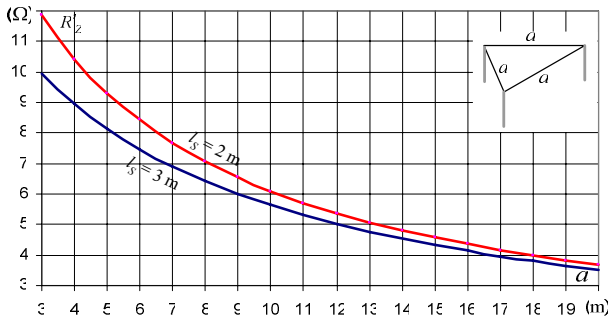
$$R_{RZ} = \mathcal{R}_{RZ} \cdot \frac{\rho}{100}. \quad (6.2)$$

Анализите на голем број примери покажуваат дека обликот на триаголникот од сл. 6.7а е малку влијателен врз големината на отпорноста на работниот заземјувач, односно дијаграмот од сл. 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 рамностранот ($L_{\Sigma} = 3a$). Исклучок се прави само во случајот кога триаголникот е дегенериран во отсечка, (табела 6.4 и дијаграм од сл. 6.7б). Значи рамностранот триаголник со страна a може да се замени со разностран триаголник со периметар $L_{\Sigma} = 3a$ или, пак, со отсечка со должина $L_{\Sigma} = 2a$.

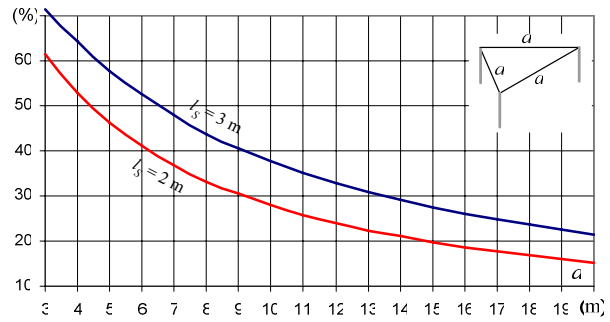
Табела 6.4. Карактеристики на работен заземјувач во форма на рамностран триаголник со страница a и во форма на отсечка (дегенериран триаголник) со должина $a + a = 2a$

a (m)	рамностран триаголник со страна a				отсечка со должина $a+a = 2a$			
	$l_S = 3 \text{ m}$		$l_S = 2 \text{ m}$		$l_S = 3 \text{ m}$		$l_S = 2 \text{ m}$	
	$\mathcal{R}_Z (\Omega)$	(%)	$\mathcal{R}_Z (\Omega)$	$I_S (\%)*$	$\mathcal{R}_Z (\Omega)$	$I_S (\%)*$	$\mathcal{R}_Z (\Omega)$	$I_S (\%)*$
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

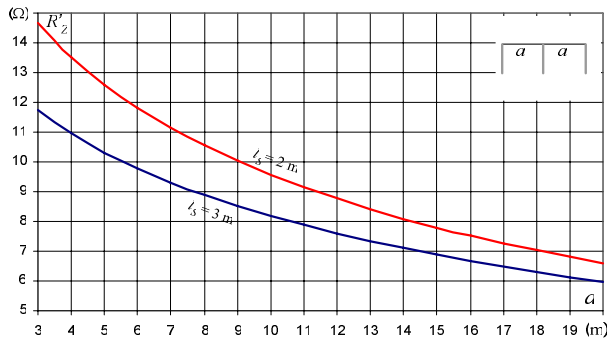
*) процентуално учество на струјата на одведување од вертикалните сонди



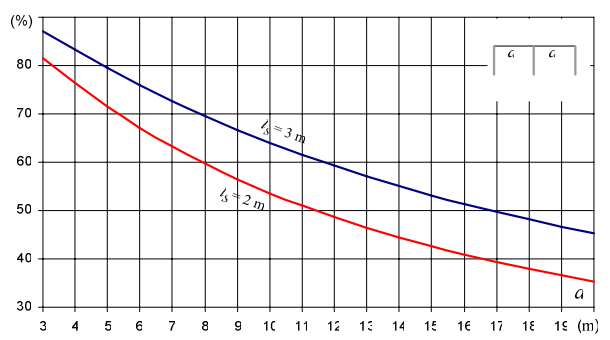
Слика 6.8а. Зависност $R_z = f(a)$ кај работен заземјувач во форма на рамностран триаголник



Слика 6.8б. Учество I_s (%) на сондите во одведувањето на струјата во земјата



Слика 6.9а. Зависност $R_z = f(a)$ кај работен заземјувач во форма на отсечка (сл. 6.7б)



Слика 6.9б. Учество I_s (%) на сондите во одведувањето на струјата во земјата

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 $R_{RZ} \leq 5 \Omega$. 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 $R_{RZ} \leq 10 \Omega$ 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 $R_{\rho 1}$, добиена под претпоставката дека е тлото хомогено со специфична отпорност ρ_1 , и еден корекционен фактор c_ρ :

$$R = c_\rho \cdot R_{\rho 1} \quad (6.3)$$

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 $k = \rho_2/\rho_1$, 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 распространување на заземјувачот R_{RZ} .

6.3. ЗАЗЕМЈУВАЊЕ НА ТС СН/СН

6.4. 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 спроводен 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.

6.4.1. 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

Апобршина 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.

Формули за пресметка на отпорноста на распростирање на мрежестиот заземјувач R_Z

1) Формула базирана на еквиваленција на мрежата со еквивалентна кружна плоча:

$$R_Z = 0,443 \cdot \frac{\rho}{\sqrt{A}}. \quad (6.4)$$

2) Формула на Лоран (Laurent):

$$R_Z = 0,443 \cdot \frac{\rho}{\sqrt{A}} + \frac{\rho}{L_\Sigma}. \quad (6.5)$$

3) Формула на Шверак (Sverak)

$$R_Z = \rho \cdot \left[\frac{1}{L_\Sigma} + \frac{1}{\sqrt{20A}} \left(1 + \frac{1}{1 + h \cdot \sqrt{20/A}} \right) \right] \quad (6.6)$$

4) Формула на Тапар (Thapar) [6]

$$R_Z = \rho \cdot \left[\frac{1}{L_\Sigma} + \frac{1}{\sqrt{20A}} \left(1 + \frac{1}{1 + h \cdot \sqrt{20/A}} \right) \right] \cdot 1,52 \cdot \left[2 \ln \left(L_p \sqrt{\frac{2}{A}} \right) - 1 \right] \cdot \frac{\sqrt{A}}{L_p} \phi \quad (6.7)$$

5) Формула на Нахман [5]

$$R_Z = 0,13 \cdot \frac{\rho}{\sqrt{A}} \log_{10} \left(\frac{2400 \cdot \sqrt{A}}{N} \right) \cdot \left(1 - 0,45 \cdot \frac{l_S}{\sqrt{A}} \right); \quad \frac{l_S}{\sqrt{A}} \leq 0,2 \quad (6.8)$$

Формулите (6.4) – (6.8) се наведени по “старост”. Постојат и мноштво други, помалку или повеќе успешни, формули за пресметување на отпорноста на заземјувачот R_Z .

Формулата (6.4) 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 (6.5) 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 (6.6) е исто така познатата класична формула, која се користи прилично во проектантската практика. Дава добри резултати за кога заземјувачот има правилна, квадратни или правоаголна форма.

Формулата (6.7) на Тапар и Герез (Gerez), пак, може да се користи и за случаите кога заземјувачот има неправилна L-форма, T-форма и сл. Меѓутоа во случајот кога заземјувачот има и вертикални елементи таа станува скоро неприменлива. Во тој случај може да се употребува релацијата на Нахман (6.8) преземена од [5].

Формули за пресметка на максималната потенцијална разлика на допир $E_m = E_{d,max}$

$$E_m = \rho \cdot K_m \cdot K_{im} \cdot \frac{I_Z}{L_{em}} = \rho \cdot K_m \cdot K_{im} \cdot \frac{I_Z}{L_\Sigma + 1,15 \cdot L_{\Sigma V}}, \quad (6.9)$$

$$K_m = \frac{1}{2\pi} \cdot \left[\ln \left(\frac{D^2}{16h \cdot d} + \frac{(D+2h)^2}{8D \cdot d} - \frac{h}{4d} \right) + \frac{K_{ii}}{K_h} \cdot \ln \left(\frac{8}{\pi \cdot (2n-1)} \right) \right], \quad (6.10)$$

$$K_{ii} = (2n)^{-(n/2)}. \text{ (За мрежи со вертикални сонди } K_{ii} = 1). \quad (6.11)$$

$$K_h = \sqrt{1+h}, \quad (6.12)$$

$$K_{im} = 0,656 + 0,172 \cdot n \text{ (} K_{im} \text{ = фактор на нерамномерност на распределба на струјата)} \quad (6.13)$$

Формули за пресметка на максималната потенцијална разлика на чекор $E_c = E_{c.\max}$

$$E_c = \rho \cdot K_c \cdot K_{ic} \cdot \frac{I_Z}{L_{ec}} = \rho \cdot K_c \cdot K_{ic} \cdot \frac{I_Z}{L_\Sigma + 2 \cdot L_{\Sigma V}}, \quad (6.14)$$

$$K_c = \frac{1}{\pi} \cdot \left[\frac{1}{2h} + \frac{1}{D+h} + \frac{W}{D} \right], \quad (6.15)$$

$$K_{ic} = 0,94 + 0,047 \cdot n, \quad (6.16)$$

$$W = 0,5 + 0,9 \cdot \ln \frac{n-1}{2}. \text{ (} W = 0 \text{ за } n = 2). \quad (6.17)$$

6.4.2. Случај кога мрежестиот заземјувач е закопан во двослој со параметри ρ_1 , ρ_2 и H

Досегашните формули (6.4) ÷ (6.17) се однесуваат 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:

$$R_Z^{(n)} = C_\rho \cdot R_Z = \left(\frac{\rho_2}{\rho_1} \right)^x \cdot R_Z, \quad (6.18)$$

$$x = 0,14 \cdot \log_{10} \left(\frac{44 \cdot N \cdot \sqrt{A}}{H^2} \right); \quad \text{за } 0,2 \leq \frac{\rho_2}{\rho_1} \leq 1, \quad (6.19)$$

$$x = 0,12 \cdot \log_{10} (3160 \cdot N \cdot \sqrt{A}) - 0,2 \cdot \log_{10} H \cdot \log_{10} \frac{1000}{\sqrt{A}}; \quad \text{за } 1 \leq \frac{\rho_2}{\rho_1} \leq 5. \quad (6.20)$$

2) случај кога мрежестиот заземјувач има вертикални елементи, распоредени по неговата периферија.

$$R_Z^{(n)} = C_R \cdot R_Z = \left(\frac{\rho_2}{\rho_1} \right)^{0,76} \cdot R_Z \text{ (} \rho_2 < \rho_1). \quad (6.21)$$

Формули за пресметка на максималната потенцијална разлика на допир $E_m^{(n)} = E_{d.\max}^{(n)}$

$$E_m^{(n)} = E_{d.\max} = C_m \cdot E_m = \left(\frac{\rho_2}{\rho_1} \right)^x \cdot E_m, \quad (6.22)$$

$$x = 0,042 \cdot \log_{10} (3,53 \cdot H) \cdot (\log_{10} N)^2 - \frac{1}{2} \cdot \log_{10} \frac{H}{6}; \quad \text{за } \rho_2 < \rho_1, \quad (6.23)$$

$$x = 0,12 \cdot \log_{10}(N \cdot \sqrt{A}) - 0,16 \cdot \log_{10}(4,6 \cdot H); \text{ за } \rho_2 > \rho_1. \quad (6.24)$$

Формули за пресметка на максималната потенцијална разлика на чекор $E_c^{(n)} = E_{c.\max}^{(n)}$

$$E_c^{(n)} = E_{c.\max}^{(n)} = C_c \cdot E_c = [1 + 0,7 \cdot \log_{10}(\rho_2 / \rho_1)] \cdot E_c \quad (6.25)$$

6.4.3. 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 експлоатирале 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 $U_{d.\text{doz}} = 230$ V, односно треба да важи:

$$E_d \leq E_{d.\text{doz}} = 230 + 0,34 \cdot \rho_p. \quad (6.26)$$

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.

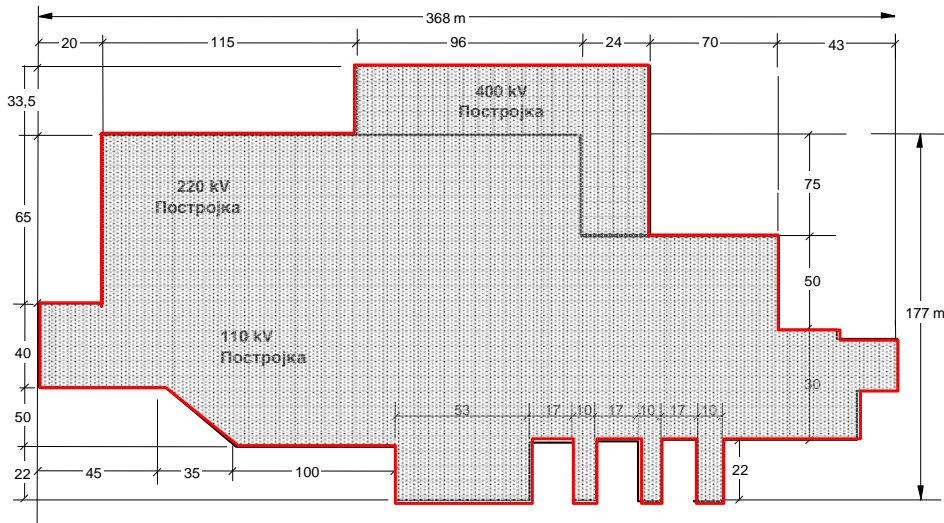
Покрај овие мерки, во самата ТС ВН/СН се практикува изолирање на потенцијално опасните места околу оградата со поставување на изолационен слој асфалт со дебелина 1 cm, или пак слој чакал со дебелина сса 10 cm и со ширина најмалку 1,25 m. Истовремено металните плаштеви и арматурите на каблите кои излегуваат 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 $U_d = 115$ V – вредност што и соодвествува на времето на исклучување на грешката $t = 0,25$ 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 поцинкован 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.

Пресметка на мрежестите заземјувачи на ТС ВН/СН со компјутерска симулација

Емпириските релации (6.4) · · · (6.26) 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 др.

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 сл. 6.10. Изведен е со Си јаже 70 mm², поставено на длабочина 0,8 m. Во проектот е проценето дека специфичната отпорност на глото во реонот на самата ТС изнесува $\rho = 100 \Omega m$.



Слика 6.10. Заземјувач на ТС 220/110/35 kV Скопје 1 по проширување со 400 kV дел, Скопје 5

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 табелата 6.5.

Табела 6.5. Отпорност на распростирање на мрежестиот заземјувач пресметан според:

проектот	релација (6.6)	релација (6.8)	компјутерска симулација
$R_Z = 0,187 \Omega$	$R_Z = 0,192 \Omega$	$R_Z = 0,189 \Omega$	$R_Z = 0,190 \Omega$

Компјутерски симулации на неколку карактеристични примери ќе се изведуваат во рамките на лабораториските вежби, со примена на програмата "ZAZEM.xls"

7. НАДЗЕМЕН ВОД КАКО ЕЛЕМЕНТ ОД ЗАЗЕМЈУВАЧКИОТ СИСТЕМ НА ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТСКИТЕ МРЕЖИ

7.1. ОШШТО

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 недозволено 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 (copperweld) 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.

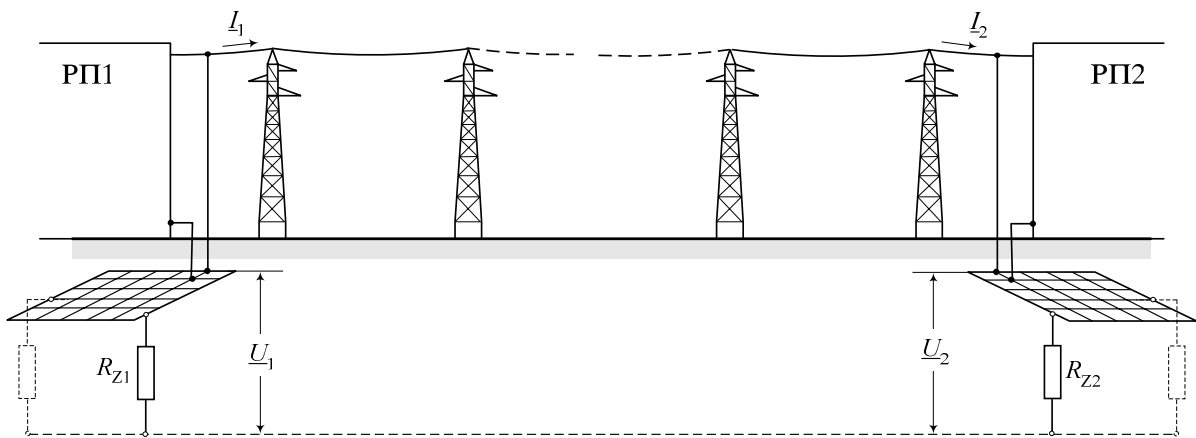
7.2. ИДЕАЛИЗИРАН МОДЕЛ НА ЗАЗЕМЈУВАЧКИОТ СИСТЕМ НА НАДЗЕМЕН ВОД

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.

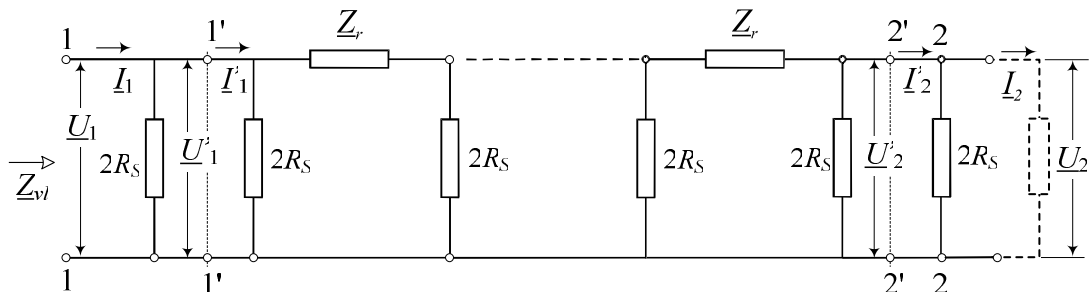
Ако во постројката "1" дојде до земјоспој, тогаш на заземјувачот од таа постројка ќе се јави некаков потенцијал U_1 (во однос на референтната земја) поради што во заштитното јаже ќе протече струја I_1 кон постројката "2". Односот на напонот U_1 и струјата I_1 ја претставува импеданцијата на заземјување на надземниот вод, т.е. "влезната импеданција" на водот:

$$Z_{vl} = \frac{U_1}{I_1} \quad (7.1)$$



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 Z_2 ќе го воспостави напонот U_2 (слика 7.1). Тука треба да се нагласи дека импеданцијата на заземјување на постројката "2" 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 слика 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}_r , која што фигурира во колото од сликата 7.2, ќе биде:

$$\underline{Z}_r = \underline{z} \cdot a = (r + jx) \cdot a \quad (7.2)$$

$$r = \frac{1000}{\kappa_{zj} \cdot A_{zj}} = \frac{1000 \cdot \rho_{zj}}{A_{zj}} \quad (7.3a)$$

$$x = 0,1445 \cdot \log \frac{2D_{ek}}{d_{zj}} + 0,0157 \cdot \mu_r \quad (7.3b)$$

Во релациите (7.3a) и (7.3b) 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 влијањето 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 релацијата (7.4)

$$D_{ek} = 658 \cdot \sqrt{\frac{\rho}{f}}, \quad (\text{m}). \quad (7.4)$$

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]:

$$\begin{aligned} \underline{U}'_1 &= \underline{U}'_2 \cdot \text{ch } \underline{ng} + \underline{Z} \cdot \underline{I}'_2 \cdot \text{sh } \underline{ng}; \\ \underline{I}'_1 &= \frac{\underline{U}'_2}{\underline{Z}} \cdot \text{sh } \underline{ng} + \underline{I}'_2 \cdot \text{ch } \underline{ng}, \end{aligned} \quad (7.5)$$

или со оглед на релациите: $\underline{U}'_1 = \underline{U}_1$ и $\underline{U}'_2 = \underline{U}_2$, се добива:

$$\begin{aligned} \underline{U}_1 &= \underline{U}_2 \cdot \text{ch } \underline{ng} + \underline{Z} \cdot \underline{I}'_2 \cdot \text{sh } \underline{ng}; \\ \underline{I}_1 &= \frac{\underline{U}_2}{\underline{Z}} \cdot \text{sh } \underline{ng} + \underline{I}'_2 \cdot \text{ch } \underline{ng}. \end{aligned} \quad (7.6)$$

Ако ги воведеме означувањата:

$$\underline{Q} = 1 + \frac{\underline{Z}_r}{2R_S} \quad (7.7)$$

тогаш може да се покаже [2] дека за параметарот g што фигурира во равенките (7.6) и (7.7) ќе важи:

$$g = \ln\left(\underline{Q} + \sqrt{\underline{Q}^2 - 1}\right) = \ln\left[1 + \frac{\underline{Z}_r}{2R_S} + \sqrt{\frac{\underline{Z}_r}{R_S} + \left(\frac{\underline{Z}_r}{2R_S}\right)^2}\right] \quad (7.8)$$

$$\underline{Z} = \sqrt{\frac{\underline{Z}_r \cdot 2R_S}{2 + \underline{Z}_r / 2R_S}} = 2R_S \cdot \sqrt{\frac{\underline{Q} - 1}{\underline{Q} + 1}}. \quad (7.9)$$

Бидејќи во реални услови е секогаш задоволена релацијата:

$$\left|\frac{\underline{Z}_r}{2R_S}\right| \ll 1, \quad (7.10)$$

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 (7.8) ќе добиеме:

$$g \approx \frac{\underline{Z}_r}{2R_S} + \sqrt{\frac{\underline{Z}_r}{R_S} + \left(\frac{\underline{Z}_r}{2R_S}\right)^2} \approx \frac{\underline{Z}_r}{2R_S} + \sqrt{\frac{\underline{Z}_r}{R_S}}. \quad (7.11)$$

или имајќи ја предвид уште и релацијата (7.9), за \underline{Z} се добива уште поупростен израз:

$$\underline{Z} \approx \sqrt{\underline{Z}_r \cdot R_S}. \quad (7.12)$$

Сега можеме да ја пресметаме и влезната импеданција \underline{Z}_{vl} , меродавна за оценка на влијанието на надземниот вод врз приликите во целиот ЗС на мрежата.

Од шемата прикажана на сликата 7.2 следува:

$$\underline{Z}_{vl} = \underline{Z}'_{vl} \Pi(2R_S) = \frac{\underline{Z}'_{vl} \cdot 2R_S}{\underline{Z}'_{vl} + 2R_S}, \quad (7.13)$$

каде што со \underline{Z}'_{vl} е означен односот помеѓу напонот \underline{U}'_1 и струјата \underline{I}'_1 , т.е.

$$\underline{Z}'_{vl} = \frac{\underline{U}'_1}{\underline{I}'_1}. \quad (7.14)$$

Ако во првата равенка од (7.5) струјата \underline{I}'_2 се изрази преку напонот \underline{U}'_2 :

$$\underline{U}'_2 = \underline{Z}'_2 \cdot \underline{I}'_2, \quad (7.15)$$

каде што е

$$\underline{Z}'_2 = \underline{Z}_2 \Pi(2R_S) = \frac{\underline{Z}_2 \cdot 2R_S}{\underline{Z}_2 + 2R_S} \quad (7.16)$$

ќе добиеме:

$$\underline{Z}'_{vl} = \underline{Z} \cdot \frac{\operatorname{ch} ng + \frac{\underline{Z}}{\underline{Z}'_2} \cdot \operatorname{sh} ng}{\operatorname{sh} ng + \frac{\underline{Z}}{\underline{Z}'_2} \cdot \operatorname{ch} ng}. \quad (7.17)$$

На тој начин, со замена на (7.17) во (7.13) може да се пресмета вредноста на влезната импеданција на водот \underline{Z}_{vl} со која неговиот заземјувачки систем може да се еквивалентира без какво и да е занемарување.

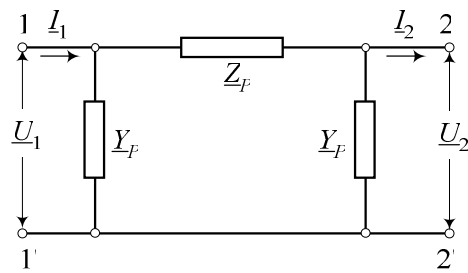
Покрај пресметката на влезната импеданција \underline{Z}_{vl} , корисно е да се знае и вредноста на потенцијалот \underline{U}_2 , пренесен на постројката "2". Пренесениот потенцијал (некои го нарекуваат изнесениот потенцијал) \underline{U}_2 можеме да го процениме преку *факторот на изнесување* \underline{k}_i :

Неговата вредност ќе ја добиеме ако во првата равенка од системот (7.5) вредноста на напонот \underline{U}'_2 се замени преку \underline{I}'_2 и \underline{Z}'_2 , според релацијата (7.15). На тој начин се добива:

$$\underline{k}_i = \frac{\underline{U}_2}{\underline{U}_1} = \frac{1}{\operatorname{ch} \underline{n} \underline{g} + \frac{\underline{Z}}{\underline{Z}'_2} \cdot \operatorname{sh} \underline{n} \underline{g}}. \quad (7.18)$$

$$\underline{U}_2 = \underline{k}_i \cdot \underline{U}_1 \quad (7.19)$$

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 (7.20) и (7.21).



Слика 7.3. π -заменска шема на заземјувачкиот систем на водот од сликата 7.1

$$\underline{Z}_P = \underline{Z} \cdot \operatorname{sh} \underline{n} \underline{g} \quad (7.20)$$

$$\underline{Y}_P = \frac{\operatorname{ch} \underline{n} \underline{g} - 1}{\underline{Z} \cdot \operatorname{sh} \underline{n} \underline{g}} + \frac{1}{2R_s} \quad (7.21)$$

Приближни изрази за величините \underline{Z}_{vl} и \underline{k}_i

Изведените релации (7.17) и (7.18) за величините \underline{Z}_{vl} и \underline{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:

$$n \geq \frac{3}{\operatorname{Re}\{g\}} = \frac{3}{\alpha} \quad (7.22)$$

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 НВ надолжната импеданција \underline{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:

$$n \leq 0,316 / |\underline{g}|,$$

со грешка до 5% важи:

$$\underline{Z}_{vl} = \frac{\underline{Z}'_2 + n \cdot \underline{Z}'_r}{1 + n \cdot \underline{Z}'_2 / R_S}; \quad \underline{Z}'_2 = \frac{2R_S \cdot \underline{Z}_2}{2R_S + \underline{Z}_2}. \quad (7.24)$$

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 \underline{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]:

$$\underline{Z}_m = r_z + 0,1445 \log \frac{D_{ek}}{D_{zm}}, \quad (7.25)$$

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) и (7.26), 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, што фигурира во (7.27) 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 (7.25) го има истото значење како и порано. Таа е дефинирана со релацијата (7.4).

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 (ФП) на кој што настанал земјоспојот и заштитното јаже ЗЈ, 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 (сл. 7.4). 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} - отпор на распростирање на заземјувачот на столбот со реден број i од НВ ;

I_{k1} - струја во фазен спроводник при КВ која тече од постројка 1 кон јазолот k ;

I_i - струја во ЗЈ во гранката i ;

V_i - потенцијал на столбот i ;

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:

$$V_{i+1} - V_i - Z_{ri} \cdot I_i + Z_{mi} \cdot I_{k1} = 0. \quad (7.28)$$

Равенката (7.28) дозволува посматрањето на распонот 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 E_i (слика 7.5) чија вредност се пресметува според равенката (7.29):

$$E_i = Z_{mi} \cdot I_{k1}. \quad (7.29)$$

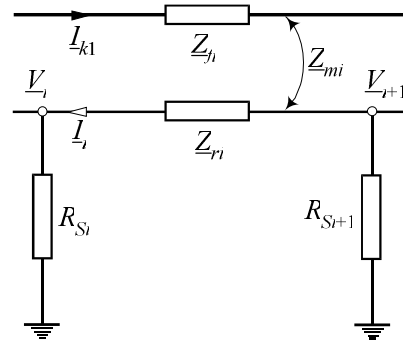
Од (7.28) и (7.29) следува:

$$V_{i+1} - V_i = Z_{ri} \cdot I_i - E_i = 0. \quad (7.30)$$

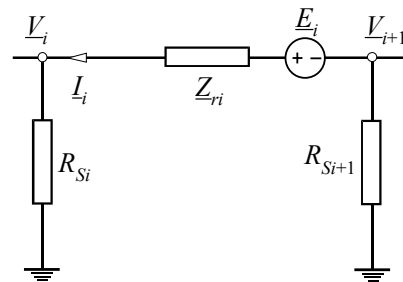
Ако во шемата од слика 7.5 се изврши трансфигурација на напонскиот генератор во струен (слика 7.6), ќе се добие нов модел во кој напонскиот генератор е еквивалентиран со струен генератор со струја J_i .

$$J_i = \frac{E_i}{Z_{ri}} = \frac{Z_{mi}}{Z_{ri}} \cdot I_{k1}. \quad (7.31)$$

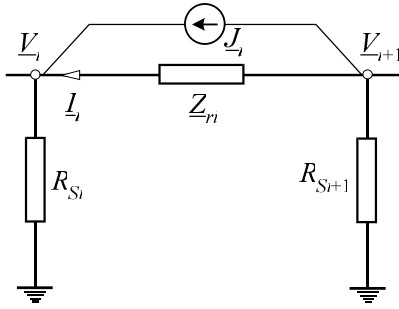
Овој струен генератор понатаму може да се еквивалентира со помош на два струјни генератора како на сликата 7.7.



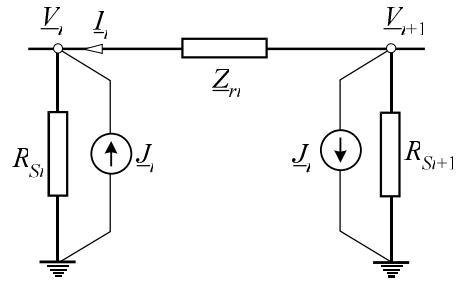
Слика 7.4. Приказ на еден распон од НВ кој се наоѓа лево од местото на грешката



Слика 7.5. Заменска шема на еден распон со еквивалентен напонски генератор



Слика 7.6. Заменска шема на еден распон со еквивалентен струен генератор

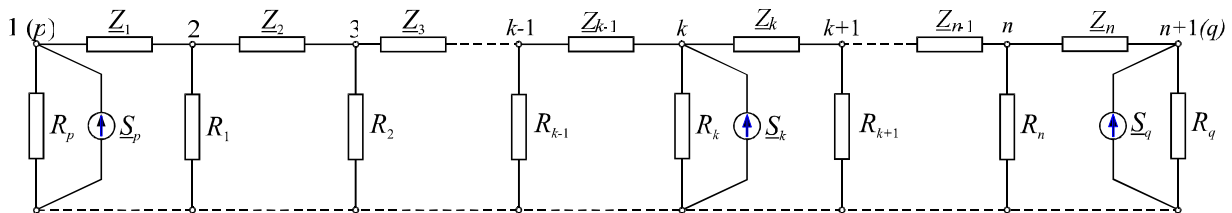


Слика 7.7. Заменска шема со еквивалентни струјни генератори

На овој начин меѓусебната индуктивност помеѓу фазниот спроводник и заштитното јаже (ЗЈ) во секој распон i ($i \leq k-1$) се зема предвид преку 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 слика 7.4. со таа разлика што насоките на струите сега ќе бидат обратни.

Доколку секој од распоните a_i ($i = 1, n$) од НВ се прикаже со помош на еквивалентот од сликата 7.7, тогаш целиот ЗС, кој претставува каскада од $n+1$ 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.



Слика 7.8. Еквивалентна шема на ЗС од посматраниот надземен 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 . Да забележиме дека според (7.31), струите на овие струјни генератори не зависат од должината на распонот, туку од односот Z_{mi}/Z_{ri} кој што 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 струи S_p , S_k и S_q , поставени во јазелот на грешката k и на краевите од надземенниот вод p и q . Големините на овие струи се пресметуваат со помош на релациите (7.32).

$$\begin{aligned}
 J_k &= I_{k1} + I_{k2}; \\
 S_p &= \frac{Z_m}{Z_r} \cdot I_{k1}; \quad S_q = \frac{Z_m}{Z_r} \cdot I_{k2}; \quad S_k = J_k - S_p - S_q = J_k \cdot \left(1 - \frac{Z_m}{Z_r}\right)
 \end{aligned}
 \tag{7.32}$$

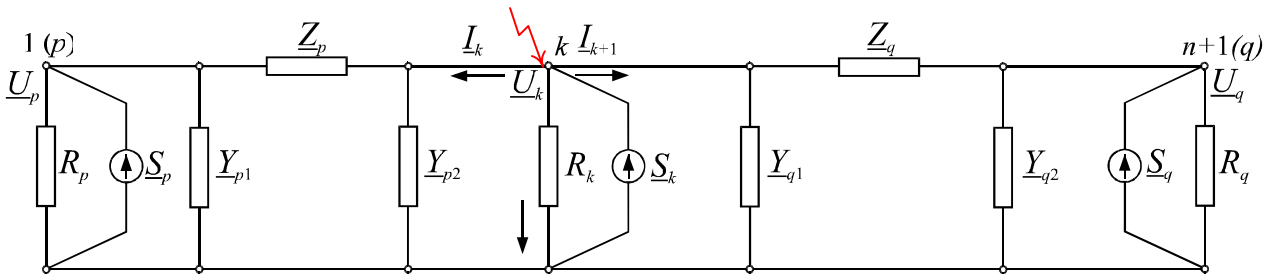
Во колото од сликата 7.8 со R_p и R_q се означени отпорностите на распростирање на заземјувачите во крајните постројки p и q , додека со R_i ($i=1, n$) и $Z_i = Z_{r_i}$ ($i=1, n+1$) се означени отпорностите на распростирање на заземјувачите од столбовите и импеданците на заштитното јаже во одделните распони од водот.

Познато е дека за пресметување на распределбата на фазните струи \underline{I}_s , I_{k1} и 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 \underline{U}_k на столбот k кај кој настанал земјоспојот, но и пресметување на струите \underline{I}_k и \underline{I}_{k+1} што течат во ЗЈ лево и десно од местото на грешката.

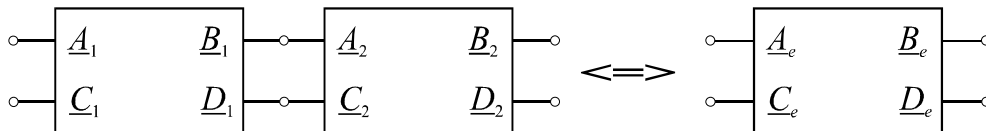
а) Модел на водот

На сликата 7.9 е прикажана упростена шема на ЗС од сликата 7.8.



Слика 7.9. Упростена шема на колото од сликата 7.8

Во неа делот од ЗС на водот лево од местото на грешката k е прикажан со еден еквивалентен π -четворопол 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 -четворопол, со параметри \underline{Y}_{q1} , \underline{Y}_{q2} и \underline{Z}_q . Параметрите на двата еквивалентни π -четворопола 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 четворопола со еден еквивалентен, според процедурата шематски прикажана на сликата 7.10 и равенката (7.33).



Слика 7.10. Еквивалентирање на два каскадно врзани четворопола со еден еквивалентен

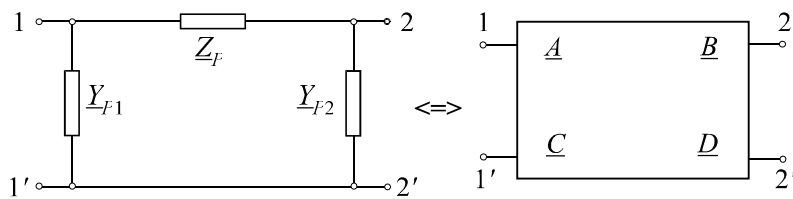
Параметрите на еквивалентниот четворопол се пресметуваат со равенките:

$$\begin{aligned}
 \underline{A}_e &= \underline{A}_1 \cdot \underline{A}_2 + \underline{B}_1 \cdot \underline{C}_2; \\
 \underline{B}_e &= \underline{A}_1 \cdot \underline{B}_2 + \underline{B}_1 \cdot \underline{D}_2; \\
 \underline{C}_e &= \underline{C}_1 \cdot \underline{A}_2 + \underline{D}_1 \cdot \underline{C}_2; \\
 \underline{D}_e &= \underline{C}_1 \cdot \underline{B}_2 + \underline{D}_1 \cdot \underline{D}_2.
 \end{aligned}
 \tag{7.33}$$

т.е. важи:

$$\begin{bmatrix} \underline{A}_1 & \underline{B}_1 \\ \underline{C}_1 & \underline{D}_1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \underline{A}_2 & \underline{B}_2 \\ \underline{C}_2 & \underline{D}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{A}_e & \underline{B}_e \\ \underline{C}_e & \underline{D}_e \end{bmatrix}.
 \tag{7.34}$$

Притоа меѓу \underline{A} , \underline{B} , \underline{C} , \underline{D} параметрите на еден π -четворопол и неговите параметри \underline{Y}_{P1} , \underline{Y}_{P2} , \underline{Z}_P (слика 7.11), постојат еднозначни релации дадени со следните изрази:



Слика 7.11. Општ случај на π -четворопол

$$\begin{aligned}
 \underline{A} &= 1 + \underline{Z}_P \cdot \underline{Y}_{P2} \\
 \underline{B} &= \underline{Z}_P \\
 \underline{C} &= \underline{Y}_{P1} + \underline{Y}_{P2} + \underline{Z}_P \cdot \underline{Y}_{P1} \cdot \underline{Y}_{P2} \\
 \underline{D} &= 1 + \underline{Z}_P \cdot \underline{Y}_{P1}
 \end{aligned}
 \tag{7.35}$$

$$\begin{aligned}
 \underline{Z}_P &= \underline{B} \\
 \underline{Y}_{P1} &= (\underline{D} - 1) / \underline{B} \\
 \underline{Y}_{P2} &= (\underline{A} - 1) / \underline{B}
 \end{aligned}
 \tag{7.36}$$

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 напон \underline{U}_k и бараните струи \underline{I}_k и \underline{I}_{k+1} , а по потреба и напоните \underline{U}_p и \underline{U}_q .

Доколку е потребно да се пресметаат и преостанатите напони и струи во ЗЈ од надземниот вод, тогаш се враќаме на колото од сликата 7.8. Тргнувајќи од јазелот k со познат напон \underline{U}_k и познати струи \underline{I}_{k-1} 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), sukcesивно 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, корегирана за т.н. редукионен фактор, на водот \underline{r}_f :

$$\underline{S}_k = \underline{J}_k - \frac{\underline{Z}_m}{\underline{Z}_r} \underline{I}_{k1} - \frac{\underline{Z}_m}{\underline{Z}_r} \underline{I}_{k2} = \underline{J}_k \cdot (1 - \underline{r}_f),
 \tag{7.37}$$

$$\underline{r}_f = 1 - \frac{\underline{Z}_m}{\underline{Z}_r}.
 \tag{7.38}$$

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/Ѓ 240/40 mm²;

– заштитно јаже: Fe III 50 mm². ($A_{zj} = 50 \text{ mm}^2$; $d_{zj} = 9 \text{ mm}$; $r_{zj} = 3 \text{ } \Omega/\text{km}$; $\mu_r = 30$);

– просечна вредност на распонот $a = 300 \text{ m}$.

Водот минува низ нерамен карпест терен со просечна специфична отпорност на плото $\rho = 500 \text{ } \Omega\text{m}$. Изведен е, главно, со носечки столбови тип М4, производ на "Енергоинвест" – Сараево, чии што изглед и димензии се прикажани на сликата П.7.1.

Решение:

Подолжните параметри $\underline{z} = (r+jx)$ на заштитното јаже како и сопствената импеданција на јаже во еден распон \underline{Z}_r се добиваат со помош на изразите (7.2) ÷ (7.4):

$$\underline{Z}_r = \underline{z} \cdot a = (r + jx) \cdot a$$

$$r = r_z + \frac{1000}{\kappa_{zj} \cdot A_{zj}} = \frac{1000 \cdot \rho_{zj}}{A_{zj}} = 0,05 + \frac{1000 \cdot 0,15}{50} = 3,05 \frac{\Omega}{\text{km}};$$

$$D_{ek} = 658 \cdot \sqrt{\frac{\rho}{f}} = 658 \cdot \sqrt{\frac{500}{50}} = 2081 \text{ m}.$$

$$x = 0,1445 \cdot \log \frac{2D_{ek}}{d_{zj}} + 0,0157 \cdot \mu_r = 0,1445 \cdot \log \frac{2 \cdot 2081}{9} + 0,0157 \cdot 30 = 1,29 \frac{\Omega}{\text{km}}$$

$$\underline{z} = (r + jx) = (3,05 + j1,29) \text{ } \Omega/\text{km};$$

$$\underline{Z}_r = \underline{z} \cdot a = (0,915 + j0,387) = 0,993 \cdot e^{j22,9^\circ} \text{ } \Omega.$$

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):

$$\underline{z}_m = R_z + 0,1445 \log \frac{D_{ek}}{D_{zm}} = (0,05 + j0,354) = 0,358 \cdot e^{j82^\circ} \frac{\Omega}{\text{km}};$$

$$\underline{Z}_m = \underline{z}_m \cdot a = (0,015 + j0,106) = 0,107 \cdot e^{j82^\circ} \text{ } \Omega,$$

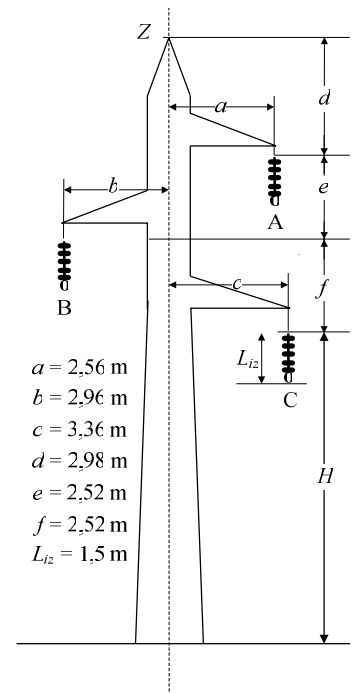
каде што растојанието D_{zm} претставува геометричка величина која што зависи од димензиите на главата на столбот и изнесува:

$$D_{zm} = \sqrt[3]{D_{zA} \cdot D_{zB} \cdot D_{zC}} = \sqrt[3]{5,16 \cdot 7,6 \cdot 10,1} = 7,343 \text{ m}.$$

Во согласност со релацијата (7.38) редуциониот фактор на водот r_f ќе биде:

$$\frac{\underline{Z}_m}{\underline{Z}_r} = \frac{\underline{z}_m}{\underline{z}} = (0,0056 + j0,0927) = 0,108 \cdot e^{j59,0^\circ}.$$

$$r_f = 1 - \frac{\underline{Z}_m}{\underline{Z}_r} = (0,944 - j0,093) = 0,949 \cdot e^{-j5,6^\circ}$$



Слика. 1

Интересно е да се забележи дека редукиониот 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 плото. Но од сите нив највлијателен е првиот параметар \underline{z} , додека величината D_{zm} или пак специфичната отпорност ρ малку влијаат врз вредноста на факторот r_f .

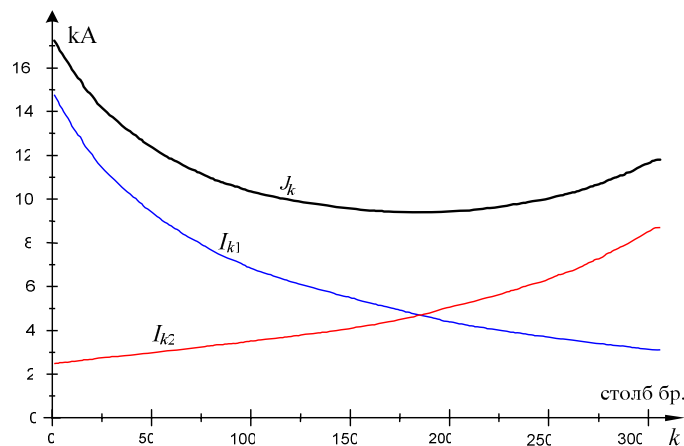
Така на пример, за овде анализираниот случај се покажува дека со промената на растојанието D_{zm} за $\pm 10\%$, редукиониот фактор се менува за помалку од $\pm 0,1\%$, а односите се слични и за поголеми промени на параметарот D_{zm} . Слично, промената на параметарот ρ малку влијае врз вредноста на редукиониот фактор r_f за што зборува следната табела.

Табела 1. Зависност на редукиониот фактор на водот од специфичната отпорност на плото ρ

ρ	D_{ek} (m)	$ r_f $	$\arg \{r_f\}$
50 Ωm	658.0	0.957	$-4,4^\circ$
100 Ωm	930.6	0.955	$-4,8^\circ$
200 Ωm	1316.0	0.952	$-5,1^\circ$
300 Ωm	1611.8	0.951	$-5,3^\circ$
400 Ωm	1861.1	0.950	$-5,5^\circ$
500 Ωm	2080.8	0.949	$-5,6^\circ$
1000 Ωm	2942.7	0.947	$-6,0^\circ$



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 г.

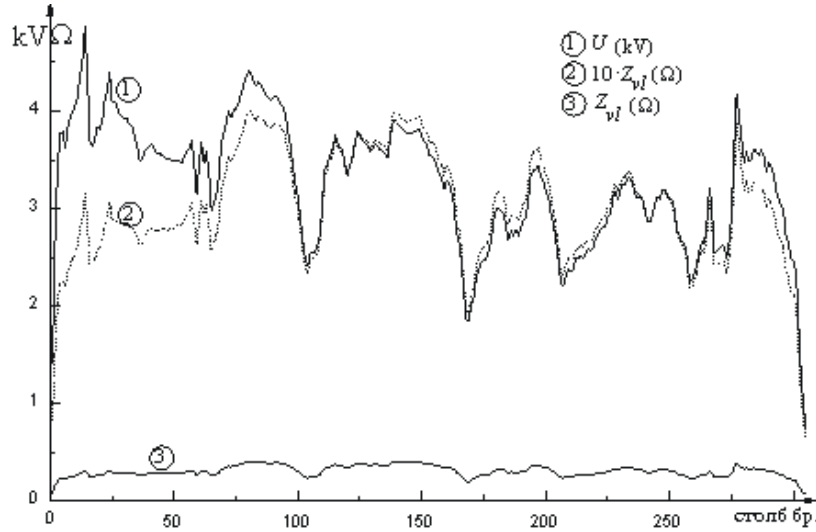


Слика 1. Зависност на големината на фазните струи на еднофазна куса врска од локацијата k

На сликата 7.12 е прикажана зависноста на фазните струи на еднофазна куса врска од локацијата на грешката. На сликата 2, пак, е прикажана зависноста на потенцијалот U_k на

столбот со рен број k ($1 < k < n+1$) на кој што настанал земјоспојот, за разни локации на местото на грешката k (крива 1). На истата слика е прикажан модулот на "влезната", т.е. еквивалентната, импеданција на водот на местото на грешка (крива 2 и 3).

Решение:



Слика 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 редуциониот фактор r_f во зависност од специфичната отпорност на плото $\rho = 100 \Omega m$ за следните 9 случаи на типот на заштитно јаже:

- а) Fe III 35 mm²; ($A_{zj} = 34,4 \text{ mm}^2$; $d_{zj} = 7,5 \text{ mm}$; $r_{zj} = 4,36 \Omega/\text{km}$);
- б) Fe III 50 mm²; ($A_{zj} = 49,5 \text{ mm}^2$; $d_{zj} = 9 \text{ mm}$; $r_{zj} = 3,032 \Omega/\text{km}$);
- в) Fe III 70 mm²; ($A_{zj} = 65,2 \text{ mm}^2$; $d_{zj} = 10,5 \text{ mm}$; $r_{zj} = 2,301 \Omega/\text{km}$);
- г) Al/Č 35/6 mm²; ($A_{zj} = 34,3 \text{ mm}^2$; $d_{zj} = 8,1 \text{ mm}$; $r_{zj} = 0,835 \Omega/\text{km}$);
- д) Al/Č 50/8 mm²; ($A_{zj} = 51,2 \text{ mm}^2$; $d_{zj} = 11,7 \text{ mm}$; $r_{zj} = 0,564 \Omega/\text{km}$);
- ѓ) Al/Č 50/30 mm²; ($A_{zj} = 51,2 \text{ mm}^2$; $d_{zj} = 11,7 \text{ mm}$; $r_{zj} = 0,564 \Omega/\text{km}$);
- е) Al/Č 95/55 mm²; ($A_{zj} = 96,5 \text{ mm}^2$; $d_{zj} = 16,0 \text{ mm}$; $r_{zj} = 0,389 \Omega/\text{km}$);
- ж) Al/Č 120/70 mm²; ($A_{zj} = 122,0 \text{ mm}^2$; $d_{zj} = 18,0 \text{ mm}$; $r_{zj} = 0,299 \Omega/\text{km}$) и
- з) AWG 126,1 mm²; ($A_{zj} = 126,1 \text{ mm}^2$; $d_{zj} = 13,0 \text{ mm}$; $r_{zj} = 0,600 \Omega/\text{km}$);

Решение:

Во примерот 7.1 беше покажано дека меѓусебното растојание D_{zm} помеѓу заштитното јаже и фазните спроводници за столбот тип М4 изнесува $D_{zm} = 7,343 \text{ m}$, додека меѓусебната импеданција Z_m помеѓу заштитното јаже и фазните спроводници изнесува:

$$z_m = R_z + 0,1445 \log \frac{D_{ek}}{D_{zm}} = (0,05 + j0,354) = 0,358 \cdot e^{j82^\circ} \frac{\Omega}{\text{km}},$$

Оваа импеданција ќе биде практично иста и за останатите 110 kV столбови бидејќи таа многу малку зависи од растојанието D_{zm} или пак отпорноста ρ .

Растојанието D_m помеѓу заштитното јаже и повратниот пат на струјата низ земјата за $\rho = 100 \Omega\text{m}$ изнесува $D_m = 930,6 \text{ m}$. Сега со помош на познатите изрази (7.2) – (7.4), на начин како што тоа беше направено во примерот 7.1, можеме да ги пресметаме најнапред подолжната импеданција на јажето \underline{z} , а потоа со релацијата (7.38) и редукциониот фактор \underline{r}_f . Резултатите од пресметките се сместени во следната табела:

Табела 1. Редукционен фактор на 110 kV водот со разни типови заштитно јаже

Тип на з. јаже	A_{zj} (mm ²)	d_{zj} (mm)	r_{zj} (Ω/km)	μ_r	$\underline{z} = (r+jx)$ (Ω/km)	$ \underline{z} $	$\arg(\underline{z})$	$ \underline{r}_f $	$\arg(\underline{r}_f)$
Fe III 35 mm ²	34.4	7.5	4.360	30	(4.410+j1.251)	4.584	15.8	0.973	-3.6
Fe III 50 mm ²	49.5	9.0	3.032	30	(3.082+j 1.289)	3.322	21.9	0.955	-4.8
Fe III 70 mm ²	65.2	10.5	2.301	30	(2.351+j 1.229)	2.653	27.6	0.935	-5.7
Al/Fe 35/6	34.3	8.1	0.835	1	(0.885+j 0.790)	1.187	41.8	0.814	-11.5
Al/Fe 50/8	48.3	9.6	0.595	1	(0.645+j 0.780)	1.012	50.4	0.753	-11.7
Al/Fe 50/30	51.2	11.7	0.564	1	(0.614+j 0.767)	0.983	51.3	0.743	-11.9
Al/Fe 95/55	96.5	16.0	0.389	1	(0.439+j 0.748)	0.867	59.6	0.681	-10.8
Al/Fe 120/70	122.0	18.0	0.299	1	(0.349+j 0.740)	0.818	64.8	0.646	-9.2
AWG 126.2	126.1	13.0	0.600	1	(0.650+j 0.761)	1.001	49.5	0.754	-12.2



Пример 7.4. 110 kV надземен вод е изведен со заштитно јаже тип Al/С 50/30. Просечната вредност на отпорностите на распростирање 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 $l = 10 \text{ km}$ 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 $a = l/n = 250 \text{ m}$.

Решение:

Најнапред, со помош на релациите (7.3) ќе ги пресметаме подолжните параметри на заштитното јаже r и x , а потоа, со помош на (7.2) и импеданцијата на јажето во еден распон \underline{Z}_r . За јажето Al/С 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:

$$D_{ek} = 658 \cdot \sqrt{\frac{\rho}{f}} = 658 \cdot \sqrt{\frac{100}{50}} = 930,6 \text{ m};$$

$$x = 0,1445 \cdot \log \frac{2D_{ek}}{d_{zj}} + 0,0157 \cdot \mu_r = 0,1445 \cdot \log \frac{2 \cdot 930,6}{11,7 \cdot 10^{-3}} + 0,0157 \cdot 1 = 0,767 \Omega/\text{km};$$

$$\underline{Z}_r = \underline{z} \cdot a = (r + jx) \cdot a = (0,564 + j0,767) \cdot 0.250 = (0,141 + j0,192) \Omega/\text{km}.$$

Понатаму, врз основа на (7.7) ја пресметуваме помошната комплексна величина 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 (7.8) и (7.9):

$$\underline{g} = \ln\left(\underline{Q} + \sqrt{\underline{Q}^2 - 1}\right) = (0,137635 + j0,0695) = 0,154185 \cdot e^{j26,79^\circ};$$

$$\underline{Z} = \sqrt{\frac{\underline{Z}_r \cdot 2R_S}{2 + \underline{Z}_r / 2R_S}} = (1,376 + j0,692) = 1,54 \cdot e^{j26,7^\circ} \Omega.$$

Водот може да се третира како "долг" бидејќи границата n_d за долгите водови изнесува:

$$n_d = 3 / \operatorname{Re}\{\underline{g}\} = 3 / 0,137635 = 22 \text{ распона } (n > n_d).$$

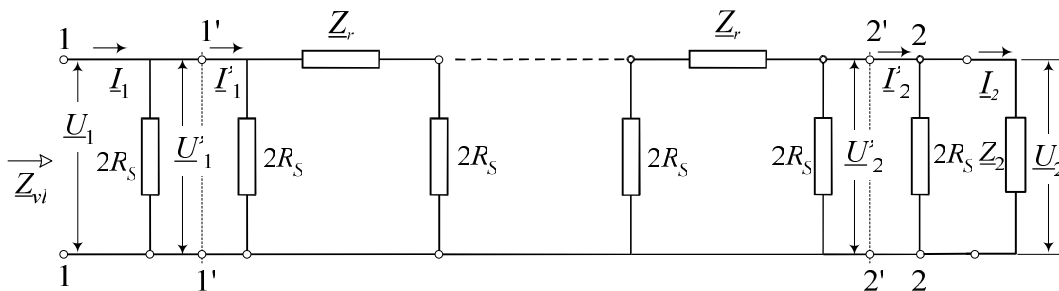
Понатаму имаме:

$$e^{n\underline{g}} = -230,095 + j87,078;$$

$$\operatorname{ch}(n\underline{g}) = (e^{n\underline{g}} + e^{-n\underline{g}}) / 2 = -115,0494 + j43,5383;$$

$$\operatorname{sh}(n\underline{g}) = (e^{n\underline{g}} - e^{-n\underline{g}}) / 2 = -115,0456 + j43,5397;$$

На сликата 1 е прикажана еквивалентната шема на водот, третиран како елемент на ЗС.



Слика 1. Шема на заземјувачкиот систем на водот

Понатаму, врз основа на (7.16) и сликата 3.7.1. можеме да пишуваме:

$$\underline{Z}'_2 = \underline{Z}_2 \Pi(2R_S) = \frac{\underline{Z}_2 \cdot 2R_S}{\underline{Z}_2 + 2R_S} = \frac{0,5 \cdot 20}{0,5 + 20} = 0,489 \Omega;$$

$$\underline{U}'_2 = \underline{Z}'_2 \cdot \underline{I}'_2$$

Понатаму, врз основа на (7.17) ќе ја добиеме вредноста на влезната импеданција \underline{Z}'_{vl} помеѓу точките 1' - 1':

$$\underline{Z}'_{vl} = \underline{Z} \cdot \frac{\operatorname{ch} n\underline{g} + \frac{\underline{Z}}{\underline{Z}'_2} \cdot \operatorname{sh} n\underline{g}}{\operatorname{sh} n\underline{g} + \frac{\underline{Z}}{\underline{Z}'_2} \cdot \operatorname{ch} n\underline{g}} = (1,37584 + j0,69192) \Omega;$$

$$\underline{Z}_{vl} = \underline{Z}'_{vl} \Pi(2R_S) = \frac{\underline{Z}'_{vl} \cdot 2R_S}{\underline{Z}'_{vl} + 2R_S} = (1,3069 + j0,60508) = 1,4402 \cdot e^{j24,84^\circ} \Omega.$$

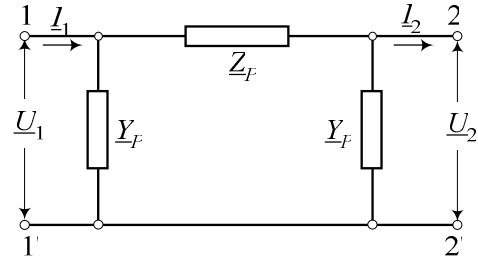
И конечно, врз основа на изразот (7.18) ќе го добиеме коефициентот на изнесување на потенцијалот k_i :

$$\underline{k}_i = \frac{\underline{U}_2}{\underline{U}_1} = \left(\operatorname{ch} n\underline{g} + \frac{\underline{Z}}{\underline{Z}'_2} \cdot \operatorname{sh} n\underline{g} \right)^{-1} = (-1,995 + j0,013) \cdot 10^{-3}; \quad |\underline{k}_i| = 0,002.$$

Значи на другиот крај од водот ќе се изнесе потенцијал во висина од само 0,2% од напонот U_1 .

$$\underline{U}_2 = k_i \cdot \underline{U}_1; \quad U_2 = 0,002 \cdot U_1.$$

Да ги пресметаме параметрите на π -заменската шема на водот, посматран како елемент на заземјувачкиот систем. Параметрите \underline{Z}_P и Y_P на оваа шема (слика 2), во согласност со релациите (7.20) и (7.21) ќе бидат:



Слика 2. π -заменска шема на заземјувачкиот систем на посматраниот вод

$$\underline{Z}_P = \underline{Z} \cdot \operatorname{sh} ng = 190,025 \cdot e^{j186^\circ} \Omega;$$

$$Y_P = \frac{\operatorname{ch} ng - 1}{\underline{Z} \cdot \operatorname{sh} ng} + \frac{1}{2R_S} = 0,6994 \cdot e^{-24,7^\circ} \text{ S.}$$

■ ■ ■

Пример 7.5. Параметрите \underline{Z}_{vl} и граничниот број на распони n_d за 110 kV надземен вод од задачата 7.1 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:

$$\underline{z} = (r + jx) = (3 + j1,239) \Omega/\text{km}; \quad \underline{Z}_r = \underline{z} \cdot a = (0,75 + j0,31) \Omega/\text{распон}.$$

Со постапка напълно иста како и во примерот 7.4 за величината g 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 (7.8) и (7.9):

$$\underline{g} = \ln\left(\underline{Q} + \sqrt{\underline{Q}^2 - 1}\right) = (0,2786 + j0,0549) = 0,284 \cdot e^{j11,15^\circ};$$

$$\operatorname{Re}\{\underline{g}\} = 0,2786; \quad n_d = 3 / \operatorname{Re}\{\underline{g}\} = 11 \text{ распони.}$$

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. 110 kV надземен вод е изведен со заштитно јаже тип Al/Č 95/55. Просечната вредност на отпорностите на распостирање на столбовите е $R_s = 10 \Omega$, а просечниот распон $a = 250$ m. Да се пресмета влезната импеданција \underline{Z}_{vl} и граничниот број на распони n_d на водот.

Решение:

■ ■ ■

Пример 7.7. 110 kV надземен вод е изведен со заштитно јаже тип Al/Č 95/55. Просечната вредност на отпорностите на распостирање на столбовите е $R_s = 15 \Omega$, а просечниот распон $a = 250$ m. Со помош на програмата "Idealiziran NV.xls" да се пресмета влезната импеданција \underline{Z}_{vl} и граничниот број на распони n_d на водот.

Колкава ќе биде влезната импеданција на водот ако заземјувачите на првите 5 столбови ги "појачаеме" така што нивните отпорности на распостирање изнесуваат $R'_s = 5 \Omega$.

Решение:

Со помош на програмата "Idealiziran NV.xls" ги дефинираме параметрите на заземјувачкиот систем на надземниот вод и ги добиваме следните резултати:

$$\text{Влезна импеданција: } \underline{Z}_{vl} = 1,712 \cdot e^{j28,1^\circ} \Omega = (1,51 + j0,81) \Omega.$$

$$\text{Потенцијал на првиот столб: } U_1\% = 90,1\%$$

$$\text{Потенцијал на вториот столб: } U_2\% = 81,2\% \text{ итн.}$$

$$\text{Граничен број на распони } n_d = 14.$$

Доколку извршиме појачување на заземјувањето на првите 5 столба, т.е. ги намалиме нивните отпорности на распостирање од 15 на 5 Ω , тогаш ќе добиеме:

$$\text{Влезна импеданција: } \underline{Z}_{vl} = 0,984 \cdot e^{j22,8^\circ} \Omega = (0,91 + j0,38) \Omega.$$

$$\text{Потенцијал на првиот столб: } U_1\% = 85,1\%$$

$$\text{Потенцијал на вториот столб: } U_2\% = 73,1\% \text{ итн.}$$

Забележуваме дека со подобрувањето на заземјувањето на само пет столба влезната импеданција на ЗС од НВ се намалила од 1,712 Ω на 0,984 Ω , т.е. за 45%. Соодветно на тој процент ќе се зголеми и струјата на одведување преку ЗС на НВ во случај на грешка во напојната ТС, а со тоа значително ќе се намалат опасностите не само во постројката туку и по должината на посматраниот надземен вод за време на земјосповеи/куси врски.

■ ■ ■

Пример 7.8. 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:

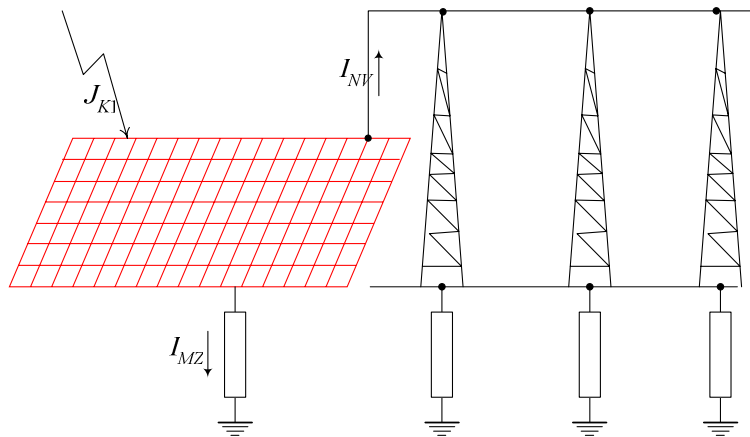
а) потенцијалот на мрежестиот заземјувач U_{MZ} , односно потенцијалот на првот столб од НВ за време на грешката;

б) уделот на струјата што се одведува преку мрежестиот заземјувач во земјата, во kA и во %. $I_{MZ} \text{ (V)}$ 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



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:

$$Z_{vl} = 1,712 \cdot e^{j28,1^\circ} \Omega = (1,51 + j0,81) \Omega$$

Според тоа еквивалентата импеданција на целиот ЗС ќе биде паралелна врска од двете претходно споменати импеданции, т.е.:

$$Z_{ek} = R_{MZ} \parallel Z_{vl} = \frac{2 \cdot (1,51 + j0,81)}{2 + (1,51 + j0,81)} = 0,951 \cdot e^{j15,2^\circ} \Omega$$

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:

$$I_{MZ} = \frac{Z_{ek}}{Z_{MZ}} \cdot J_{K1} = \frac{Z_{vl}}{Z_{vl} + Z_{MZ}} \cdot J_{K1} .$$

Со замена на бројните вредности се добива:

$$I_{MZ} = 0,476 \cdot J_{K1} = 0,476 \cdot 3 = 1,328 \text{ kA} .$$

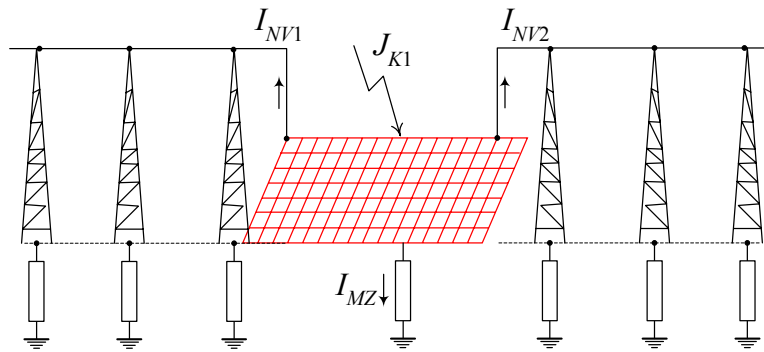
Сходно на тоа, струјата што ќе се одведува преку ЗС на НВ ќе биде:

$$I_{MZ} = \frac{Z_{ek}}{Z_{vl}} \cdot J_{K1} = \frac{Z_{MZ}}{Z_{vl} + Z_{MZ}} \cdot J_{K1} \text{ или}$$

$$I_{NV} = 0,555 \cdot J_{K1} = 1,665 \text{ kA} .$$

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:

$$Z_{ek} = R_{MZ} \parallel Z_{vl} = \frac{2 \cdot (1,51/2 + j0,81/2)}{2 + (1,51/2 + j0,81/2)} = 0,615 \cdot e^{j19,8^\circ} \Omega$$

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:

$$I_{MZ} = \frac{Z_{ek}}{Z_{MZ}} \cdot J_{K1} = 0,31 \cdot J_{K1} \quad (31\%)$$

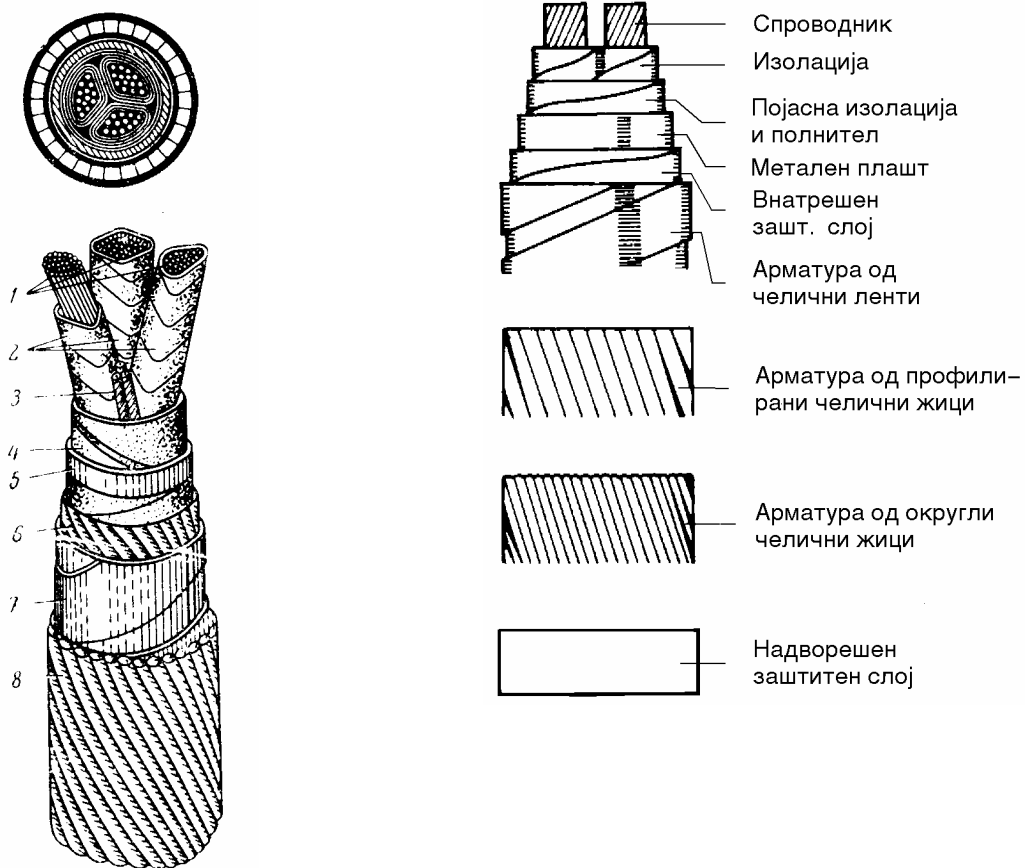
$$I_{MZ} = 0,31 \cdot J_{K1} = 0,31 \cdot 3 = 0,93 \text{ kA} .$$



8. ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТСКИТЕ 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 др.) или, пак, од синтетичка изолациона материја (поливинил-хлорид PVC, полиетилен PE, гума), наречена *внатрешен заштитен слој* или *плашт* на кабелот. Плаштот го штити кабелот од надворешните влијанија (влага, механички оштетувања, корозија и др.) (сл. 8.1). Спроводниците, заедно со нивната изолацијата ги формираат жилите на кабелот. Тие се единствениот активен дел на кабелот којшто ја врши неговата основан функција – спроведување на струјата. Сите останати елементи од неговата конструкција имаат помошна, најчесто заштитна, улога.



Слика 8.1а. Изглед на трифазен 10 kV класичен појасен кабел со изолација од импрегнирана хартија, тип IPO 13

Слика. 8.1б. Конструктивни елементи на еден класичен кабел

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) Армура (оклоп од челични ленти); 8) Надворешен заштитен слој од јута.

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.

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.

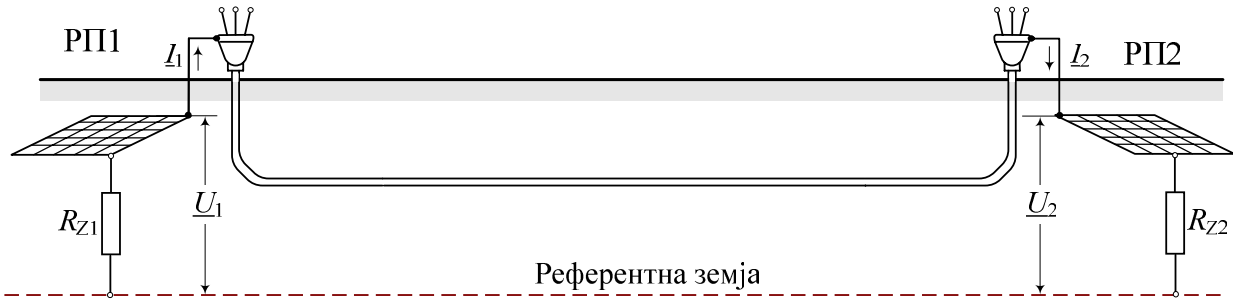
На сликата 8.1. се прикажани изгледот и конструкцијата на еден таков класичен кабел. Еден класичен кабел ги содржи следните конструктивни елементи: 1) спроводници од бакар или алуминиум; 2) фазна изолација од импрегнирана хартија (IP); 3) исполонувач на просторот (полнител - filler) од јута; 4) појасна изолација од импрегнирана хартија; 5) метален плашт (оловен или алуминиумски); 6) внатрешен заштитен слој од јута; 7) механичка заштита или арматура (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 арматура 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 арматура 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 арматура, 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 подолжно (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.

Струи и напони на металниот плашт

Ќе посматраме кабел со метален плашт и спроводен надворешен заштитен слој (кабел со неизолиран метален плашт), положен во земјата (слика 8.2).



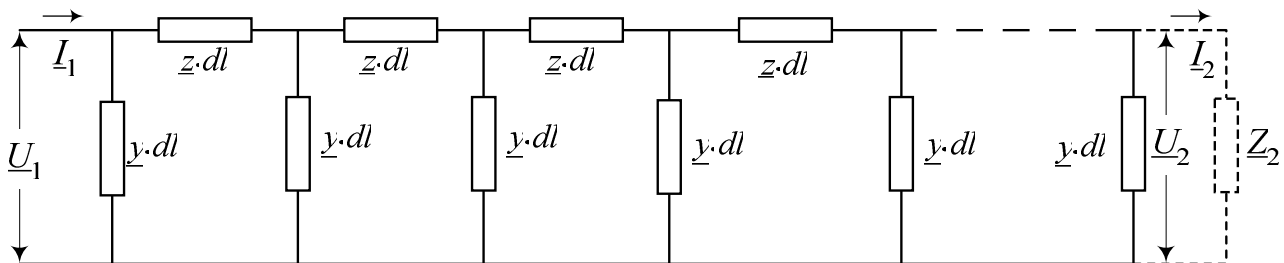
Слика 8.2. Кабел со неизолиран метален плашт поставен во земјата

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 распространување на заземјувачите во тие постојки, додека со \underline{U}_1 , \underline{I}_1 и \underline{U}_2 , \underline{I}_2 се означени напонот и струјата во плаштот-соодветно.

Ако претпоставиме дека до дефект дошло во првата постројка РП1 тогаш насоките на струите \underline{I}_1 и \underline{I}_2 ќе бидат соодветни на оние, прикажани на сликата 8.2.

Нека со \underline{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 сл. 8.3. со $\underline{z} = (r+jx)$ е означена надолжната импеданција по km должина на плаштот од кабелот со која тој се спротивставува на подолжното течење на струјата, додека со \underline{y} е означена попречната 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_k , закопан на длабочина h во хомогено тло со специфична отпорност ρ , тогаш ќе имаме:

$$R_Z = \frac{\rho}{\pi \cdot l} \cdot \ln \frac{l}{\sqrt{h \cdot d_k}}; \quad Y_Z = \frac{1}{R_Z} = \frac{\pi \cdot l}{\rho} \cdot \ln^{-1} \left(\frac{l}{\sqrt{h \cdot d_k}} \right), \quad (8.1)$$

$$\frac{Y_Z}{l} = \frac{1}{R_Z \cdot l} = \frac{\pi}{\rho} \cdot \ln^{-1} \left(\frac{l}{\sqrt{h \cdot d_k}} \right) \quad (8.2)$$

$$\underline{y} = \left(\frac{Y_Z}{l} \right)_{\text{за } l=1000\text{m}} = (g + jb) \quad (8.3)$$

$$b = 0; \quad g = \frac{\pi}{\rho} \cdot \ln^{-1} (l / \sqrt{h \cdot d_k}), \quad \left(\frac{\text{S}}{\text{km}} \right) \quad (8.4)$$

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 $\underline{\gamma}$:

$$\underline{\gamma} = \sqrt{\underline{z} \cdot \underline{y}} = \sqrt{(r + jx) \cdot g} = (\alpha + j\beta) \quad (8.6)$$

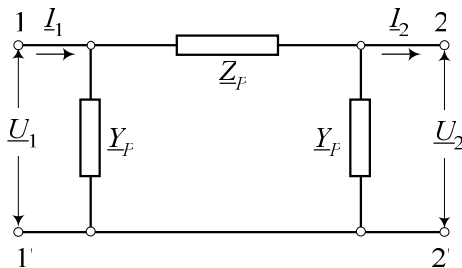
– карактеристична импеданција \underline{Z}_C :

$$\underline{Z}_C = \sqrt{\frac{\underline{Z}}{\underline{Y}}} = \sqrt{\frac{\underline{z}}{\underline{y}}} = \sqrt{\frac{r + jx}{g}} \quad (8.7)$$

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 биде:

$$\begin{aligned} \underline{U}(x) &= \underline{U}_2 \cdot \text{ch } \underline{\gamma}(l-x) + \underline{Z}_C \cdot \underline{I}_2 \cdot \text{sh } \underline{\gamma}(l-x), \\ \underline{I}(x) &= \frac{\underline{U}_2}{\underline{Z}_C} \cdot \text{sh } \underline{\gamma}(l-x) + \underline{I}_2 \cdot \text{ch } \underline{\gamma}(l-x). \end{aligned} \quad (8.5a)$$

Релациите (8.5) имаат ист облик како и релациите (7.6) што важеа за надземните водови со таа разлика што кај (8.5) место ng , како аргумент на хиперболичните функции $\text{sh}()$ и $\text{ch}()$ фигурира аргументот $\underline{\gamma}l$. Таа аналогија може да се искористи за едноставно изведување на одделните карактеристични величини на кабелот.



Слика 8.4. π -заменска шема на заземјувачкиот систем на кабелот од сликата 8.2

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:

$$\underline{Z}_P = \underline{Z}_C \cdot \text{sh } \underline{\gamma}l \quad (8.8)$$

$$\underline{Y}_P = \frac{\text{ch } \underline{\gamma}l - 1}{\underline{Z}_C \cdot \text{sh } \underline{\gamma}l} \quad (8.9)$$

Влезна импеданција и пренесен (изнесен) потенцијал

Аналогно на изразот (7.18) за коефициентот на изнесување на потенцијалот ќе имаме:

$$\underline{k}_i = \frac{\underline{U}_2}{\underline{U}_1} = \frac{1}{\operatorname{ch} \underline{\gamma} l + \frac{\underline{Z}_C}{\underline{Z}_2} \cdot \operatorname{sh} \underline{\gamma} l}; \quad \underline{U}_2 = \underline{k}_i \cdot \underline{U}_1. \quad (8.10)$$

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 (7.17):

$$\underline{Z}_{vl} = \underline{Z}_C \cdot \frac{\operatorname{ch} \underline{\gamma} l + \frac{\underline{Z}_C}{\underline{Z}_2} \cdot \operatorname{sh} \underline{\gamma} l}{\operatorname{sh} \underline{\gamma} l + \frac{\underline{Z}_C}{\underline{Z}_2} \cdot \operatorname{ch} \underline{\gamma} l}. \quad (8.11)$$

Релациите (8.10) и (8.11) 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).

"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:

$$l_d = \frac{\ln(\varepsilon^{-1/2})}{\operatorname{Re}\{\underline{\gamma}\}} = \frac{\ln(1/\sqrt{\varepsilon})}{\alpha}. \quad (8.12)$$

Во (8.12), 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]:

$$l_d = 70 \cdot \sqrt{\rho}, \quad (\text{m}) \quad (8.13)$$

во која специфичната отпорност ρ се изразува во (Ωm).

За долгите кабли приближно важи [2]:

$$\underline{k}_i \approx \frac{2 \cdot e^{-\alpha l}}{|1 + \underline{Z}_C / \underline{Z}_2|} \quad (8.14)$$

$$\underline{Z}_{vl} \approx \underline{Z}_C \quad (8.15)$$

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 подолжна 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:

$$\frac{\underline{Z}_{vl.1}}{\underline{Z}_{vl.2}} = \sqrt{\frac{\rho_1}{\rho_2}} \quad (8.16)$$

Ако каблите имаат различни карактеристики, т.е. различна подолжна импеданција \underline{z} , кога се положени во тло со исти карактеристики, нивните импеданции на заземјување ќе се однесуваат како:

$$\frac{\underline{Z}_{vl.1}}{\underline{Z}_{vl.2}} = \sqrt{\frac{\underline{Z}_{C1}}{\underline{Z}_{C2}}} \quad (8.17)$$

“Куси” кабли

Граничната должина l_k за која кабелот може да се смета за “кус”, според [2] се добива како решение на следната равенка:

$$|\gamma^2| \cdot l_k^2 = 2 \cdot \varepsilon \quad (8.18)$$

Слично како и за импеданцијата на заземјување кај надземните водови, за кусите кабли приближно ќе важи [2]:

$$k_i \approx \frac{1}{\left|1 + \frac{\underline{z} \cdot l}{\underline{Z}_2}\right|}, \quad (8.19)$$

$$\underline{Z}_{vl} \approx \frac{\underline{Z}_2 + \underline{z} \cdot l}{1 + \underline{Z}_2 \cdot \underline{g} \cdot l} = \frac{\underline{Z}_2 + \underline{z} \cdot l}{1 + \underline{Z}_2 / R_Z}. \quad (8.20)$$

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 А, подолжната импеданција на кабелот изнесува $\underline{z} = (r+jx) = (0,7+j2) \Omega/\text{km}$. Кога челичната арматура е заситена подолжната импеданција на кабелот изнесува $\underline{z} = (0,7+j0,7) \Omega/\text{km}$. 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 \underline{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; $\rho = 100 \Omega\text{m}$.

Решение:

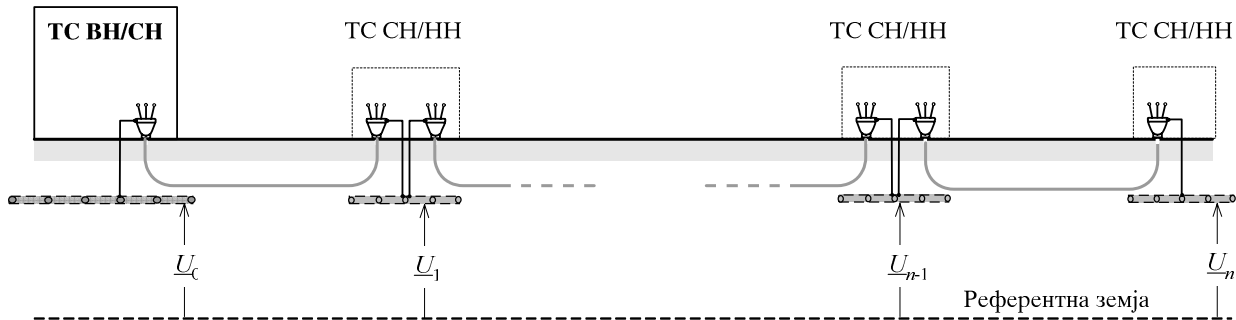


8.3. КАБЛИ СО ИЗОЛИРАН МЕТАЛЕН ПЛАШТ

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.

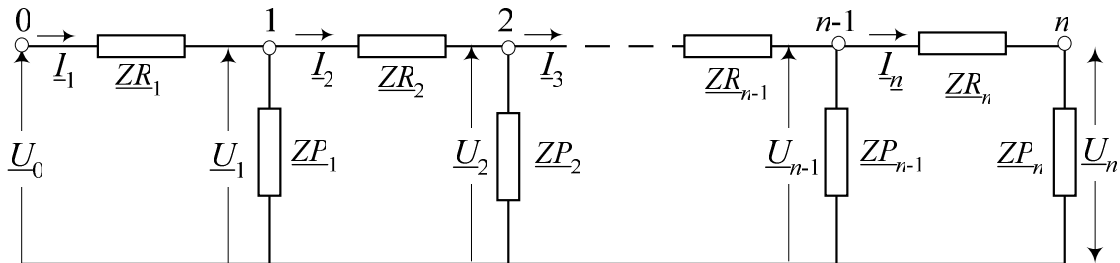
На сликата 8.5 е прикажан еден кабелски извод од кој што се напојуваат неколку трансформаторски станици среден/низок напон ТС СН/НН. Нека сите делници од изводот се изве-

дени со кабел од ист тип којшто во својата конструкција има метален плашт или електрична заштита што се изолирани и немаат можност за контакт со плото. Во секоја трансформаторска станица од изводот краевите од металниот плашт односно електричната заштита галвански се поврзуваат за заземјувачот на ТС, како што е тоа прикано на сл. 8.5.



Слика 8.5. Кабелски извод СН 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.



Слика 8.6. Заземјувачки систем на кабелскиот извод од сл. 8.5

Редните елементи $\underline{Z}R_j$ ($j = 1, n$) во шемата од сликата 8.6 ги претставуваат импеданциите на плаштот од кабелот во поедините делници од изводот. Кога се работи за делници од изводот изработени од ист тип кабел, како што е вообичаено во практиката, тогаш за елементот $\underline{Z}R_j$ ($j = 1, n$) важи:

$$\underline{Z}R_j = \underline{z} \cdot l_j = (r + jx) \cdot l_j \quad (8.21)$$

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 $\underline{Z}P_j$ ($j = 1, n$) во шемата од сл. 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 ($j=1, n$) во јазлите од заземјувачкиот систем и струите I_j ($j=1, n$) во металните плаштови од поедините секции на кабелскиот извод.

Идеализиран модел на ЗС

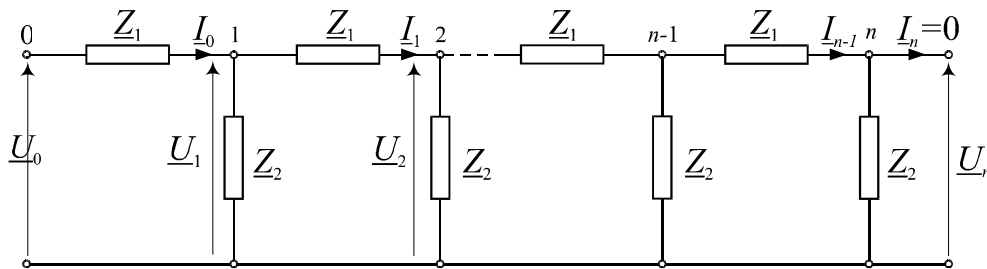
Кога делниците од изводот од сл. 8.5 се со исти должини тогаш редните импеданции на секоја редна гранка од колото на ЗС, прикажано на сликата 8.6, ќе бидат еднакви помеѓу себе, т.е.

$$\underline{Z}R_1 = \underline{Z}R_2 = \dots = \underline{Z}_1.$$

Ако истовремено и заземјувачите на попатните ТС СН/НН од изводот се со исти карактеристики и имаат иста отпорност на распостирање:

$$\underline{Z}P_1 = \underline{Z}P_2 = \dots = \underline{Z}_2,$$

тогаш колото од сликата 8.6 може да се реши и аналитички, во затворена форма.



Слика 8.7. Еквивалентна шема на заземјувачкиот систем ЗС

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 . ЗС од набљудуваниот фидер ќе го претставиме идеализирано, сметајќи дека секоја негова секција има иста должина l и иста импеданција на плаштот $\underline{Z}_1 = \underline{z} \cdot l$ и дека секоја ТС СН/НН има иста импеданција на заземјувачот \underline{Z}_2 (слика 8.7).

По аналогија на идеализираниот модел за ЗС на надземен вод од точката 4.1, за ЗС од слика 8.7 во [2] се изведени релации со кои се дефинираат односите помеѓу приликите на почетокот ($\underline{U}_0, \underline{I}_0$) и крајот ($\underline{U}_n, \underline{I}_n$) од изводот.

$$\begin{aligned} \underline{U}_0 &= \underline{U}_n \operatorname{ch} n\underline{g} + \underline{I}_n \underline{Z}_C \operatorname{sh} n\underline{g} \\ \underline{I}_0 &= \frac{\underline{U}_n}{\underline{Z}_C} \operatorname{sh} n\underline{g} + \underline{I}_n \operatorname{ch} n\underline{g} \end{aligned} \quad (8.21)$$

Параметрите \underline{g} и \underline{Z}_C на изводот кои фигурираат во системот равенки (8.21) се пресметуваат со помош на изразите ([2]):

$$\underline{g} = \ln \left[1 + \frac{\underline{Z}_1}{\underline{Z}_2} + \sqrt{2 \cdot \frac{\underline{Z}_1}{\underline{Z}_2} + \frac{\underline{Z}_1^2}{\underline{Z}_2^2}} \right]. \quad (8.22)$$

$$\underline{Z}_C = \frac{\underline{Z}_1}{\sqrt{2 \cdot \frac{\underline{Z}_1}{\underline{Z}_2} + \frac{\underline{Z}_1^2}{\underline{Z}_2^2}}}. \quad (8.23)$$

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:

$$\underline{I}_n = 0 \quad (8.24)$$

и имајќи го во предвид изразот за напонот на k -тата ТС СН/НН:

$$\underline{U}_k = \underline{U}_n \cdot \text{ch}(n-k) \cdot \underline{g}; \quad k = 1, n \quad (8.25)$$

за коефициентот на изнесен потенцијал во k -тата ТС се добива

$$u(k) = \frac{U_k}{U_0} = \frac{|\text{ch}(n-k) \underline{g}|}{|\text{ch} n \underline{g}|}; \quad k = 1, n. \quad (8.26)$$

Влезната импеданција на изводот посматрана кај јазелот со индекс 0, земајќи притоа предвид дека е $I_n = 0$, ќе биде:

$$\underline{Z}_{vl} = \frac{U_0}{I_0} = \underline{Z}_c \cdot \text{cth} n \underline{g}. \quad (8.27)$$

Егзактен модел. Уважување на индуктивните спреги

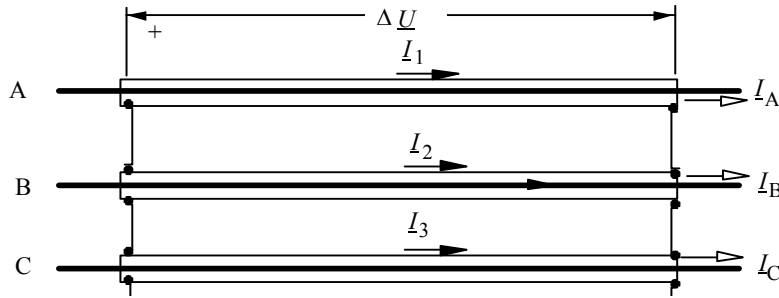
Во последно време кабелските мрежи за среден и висок напон ($U_n \geq 10$ kV) се изведуваат со помош на едножилни кабли со изолација на база на синтетичка изолација (полиетилен РЕ, вмрежен полиетилен XLPE, гума и др.) бидејќи таквите кабли имаат низа предности во однос на трижилните. Тие, по правило, 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 цилиндри. Надворешната електрода од така формираните коаксијален цилиндер е т.н. "електрична заштита" која, пак, обично се состои од бакарни жици густо намотани хеликоидално над изолацијата на жилата. Над слојот бакарни жили 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.

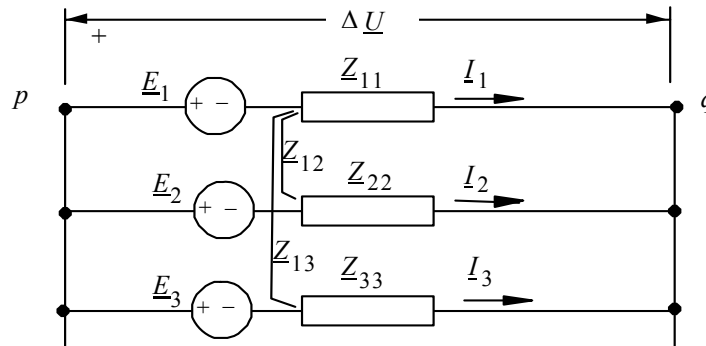
Во практиката трифазниот кабелски вод се изведува со поставување на три едножилни кабли (обично од типот ХНР, РНР, ХРЕ), во ист ров. Каблите се поставуваат во рамнина (слика 8.8а), на определено меѓусебно растојание $a = 5 \div 10$ cm, или пак, компактирано, во форма на триаголник при што каблите меѓусебно се допираат.

Во овој случај помеѓу фазните спроводници и плашковите 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 I_A, I_B, I_C . Специјален случај е режимот на земјоспој, кога струја тече само во една фаза (струјата на земјоспојот I_{k1}). Тогаш ќе биде $I_A = I_{k1}, I_B = I_C = 0$, а во плашковите од жилите протекуваат струи I_1, I_2, I_3 (слика 8.8а). Постоењето на заемните индуктивни спреги помеѓу фазните спроводници и бакарните плаштовите може да се земе предвид преку воведување на индуцирани електромоторни сили E_i ($i = 1, 3$) во секој од плашковите (слика 8.8б).



Слика 8.8а. Трифазен кабелски вод составен од три едножилни кабли



Слика 8.8б. Модел со којшто се врши распрегнување на магнетските спреги

За колото од сликата 8.8б важи:

$$[\Delta \underline{U}] = [\underline{U}_p] - [\underline{U}_q] = [\underline{E}] + [\underline{Z}] \times [\underline{I}]. \quad (8.28)$$

Во релацијата (8.28) ознаките на одделните величини го имаат следното значење:

$[\underline{E}] = [E_1 \ E_2 \ E_3]^T$ – матрица на индуцираните ЕМС во плашковите;

$[\underline{I}] = [I_1 \ I_2 \ I_3]^T$ – матрица на струите што протекуваат низ плашковите;

$[\Delta \underline{U}] = [\Delta U_1 \ \Delta U_2 \ \Delta U_3]^T$ – матрица на падовите на напон меѓу почетокот и крајот;

$[\underline{Z}] = \{Z_{ij}\}^T$ – квадратна матрица на сопствени и меѓусебни импеданции на плашковите,

со димензии 3×3 . Елементите со еднакви индекси Z_{ii} се сопствените импеданции на плашковите, додека елементите Z_{ij} се меѓусебните импеданции меѓу плашковите на каблите кои што се одредуваат со следната релација:

$$\underline{Z}_{ij} = 0,05 \cdot l + j \cdot 0,1445 \cdot \log \frac{D_e}{d_{ij}} \cdot l; \quad i = 1, 3; \quad j = 1, 3; (j \neq i). \quad (8.29)$$

Елементите од матрицата на индуцираните електромоторни сили $[\underline{E}]$ ќе бидат:

$$\underline{E}_i = \underline{Z}_{iA} \cdot \underline{I}_A + \underline{Z}_{iB} \cdot \underline{I}_B + \underline{Z}_{iC} \cdot \underline{I}_C; \quad i = 1, 3. \quad (8.30)$$

каде што импеданциите \underline{Z}_{ij} , ($j = A, B, C$) се пресметуваат со помош на релацијата (8.29). За дијагоналните елементи \underline{Z}_{ii} од матрицата $[\underline{Z}]$ кои што се однесуваат на жилата i ($i = 1, 3$), \underline{Z}_{ii} ќе биде сопствената импеданција самиот плашт на жилата i . Таа се пресметува повторно со помош на релацијата (8.29) само што сега за растојанието d_{ij} се зема дека е еднакво на средниот радиус на плаштот од i -тата жила.

Доколку се познати вредностите на падот на напон $[\Delta \underline{U}]$ лесно, преку релацијата (8.28), се определуваат струите $[\Delta \underline{I}]$ низ плаштевите од кабелот:

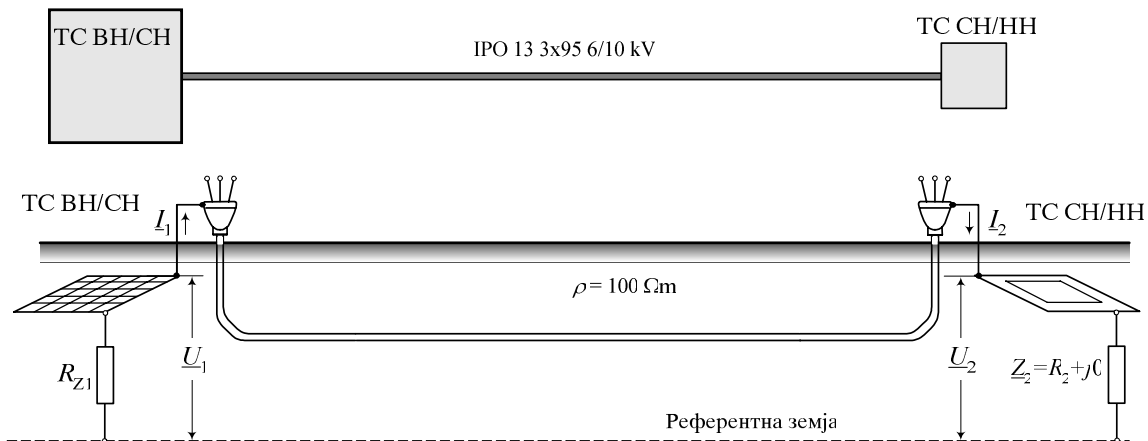
$$[\underline{I}] = [\underline{Z}]^{-1} \times ([\underline{E}] - [\Delta \underline{U}]). \quad (8.31)$$

8.4. ПРИМЕРИ И ЗАДАЧИ

Пример 8.1. 10 kV кабел од типот IPO 13 3x95 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 = 0,045 m. На крајот од кабелот е приклучена трансформаторска станица СН/НН чија еквивалентна импеданција на заземјување на заштитното заземјување изнесува $\underline{Z}_2 = R_2 = (5+j0) \Omega$. Потребно е да се пресмета:

- еквивалентната (влезната) импеданција на кабелот \underline{Z}_{vi} ;
- граничната должина l_d после која кабелот може да се третира како бесконечно долг;
- коефициентот на изнесување на потенцијалот 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.

Останати податоци: надворешен пречник на кабелот $d_k = 4,5$ cm = 0,045 m; импеданција по единица должина на металниот плашт заедно со челичната арматура: $\underline{z} = (0,7+j 2,0) \Omega/\text{km}$;



Слика 1. Кабел со неизолиран метален плашт поставен во земјата

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 араматура 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.

За да ги пресметаме бараните вредности во задачата, најнапред ќе ја пресметаме отпорноста на распростирање на плаштот од кабелот, третиран како елементарен заземјувач во форма на хоризонтална електрода. Во согласност со релацијата (8.1) ќе имаме:

$$R_Z = \frac{\rho}{\pi \cdot l} \cdot \ln \frac{l}{\sqrt{h \cdot d_k}} = \frac{100}{\pi \cdot 750} \cdot \ln \frac{750}{\sqrt{0,7 \cdot 0,045}} = 0,354 \Omega, \quad Y_Z = \frac{1}{R_Z} = 2,822 \text{ S.}$$

$$g = \frac{Y_Z}{l} = \frac{1}{R_Z \cdot l} = \frac{2,822}{0,75} = 3,763 \frac{\text{S}}{\text{km}}; \quad \underline{y} = (g + j0).$$

Сега, со помош на изразите (8.6) и (8.7) можеме да ги пресметаме параметрите \underline{Z}_C и $\underline{\gamma}$ на кабелот:

$$\underline{\gamma} = \sqrt{\underline{z} \cdot \underline{y}} = \sqrt{(r + jx) \cdot g} = \sqrt{(0,7 + j2) \cdot 3,763} = (2,303 + j1,634) \text{ (1/km);}$$

$$\underline{\gamma} = (\alpha + j\beta); \quad \alpha = 2,303 \text{ 1/km}; \quad \beta = 1,634 \text{ 1/km.}$$

$$\underline{\gamma} l = (1,727 + j1,225); \quad e^{\underline{\gamma} l} = (1,9043 + j5,2929);$$

$$\text{sh } \underline{\gamma} l = \frac{e^{\underline{\gamma} l} - e^{-\underline{\gamma} l}}{2} = (0,922 + j2,73) = 2,882 \cdot e^{j71,3^\circ};$$

$$\text{ch } \underline{\gamma} l = \frac{e^{\underline{\gamma} l} + e^{-\underline{\gamma} l}}{2} = (0,982 + j2,563) = 2,745 \cdot e^{j69,0^\circ}.$$

Карактеристичната импеданција на кабелот \underline{Z}_C ќе биде:

$$\underline{Z}_C = \sqrt{\frac{\underline{z}}{\underline{y}}} = \sqrt{\frac{r + jx}{g}} = \sqrt{\frac{0,7 + j2}{3,763}} = (0,612 + j0,434) \Omega = 0,75 \cdot e^{j35,4^\circ} \Omega \text{ и}$$

$$\frac{\underline{Z}_C}{Z_2} = \frac{0,75}{5} \cdot e^{j35,4^\circ} = 0,15 \cdot e^{j35,4^\circ}.$$

а) Пресметка на влезната импеданција на кабелот \underline{Z}_{vl}

Врз основа на релацијата (8.11) можеме да пишуваме:

$$\underline{Z}_{vl} = \underline{Z}_C \cdot \frac{\text{ch } \underline{\gamma} l + \frac{\underline{Z}_C}{Z_2} \cdot \text{sh } \underline{\gamma} l}{\text{sh } \underline{\gamma} l + \frac{\underline{Z}_C}{Z_2} \cdot \text{ch } \underline{\gamma} l} = (0,596 + j0,401) = 0,719 \cdot e^{j34^\circ} \Omega.$$

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 (8.12):

$$l_d = \frac{\ln(\varepsilon^{-1/2})}{\text{Re}\{\underline{\gamma}\}} = \frac{\ln(1/\sqrt{\varepsilon})}{\alpha} = \frac{\ln(1/\sqrt{0,05})}{2,303} = 0,65 \text{ km.}$$

в) Пресметка на коефициентот на изнесување на потенцијалот \underline{k}_i

Точната вредност на коефициентот k_i ќе ја пресметаме со помош на релацијата (8.10):

$$\underline{k}_i = \frac{1}{\operatorname{ch} \underline{\gamma} l + \frac{\underline{Z}_C}{\underline{Z}_2} \cdot \operatorname{sh} \underline{\gamma} l} = (0,089 - j0,31) = 0,323 \cdot e^{-j73,9^\circ}; \quad |\underline{k}_i| = \frac{U_2}{U_1} = 0,323.$$

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 (8.14):

$$k_i \approx \frac{2 \cdot e^{-\alpha l}}{|1 + \underline{Z}_C / \underline{Z}_2|} = \frac{2 \cdot e^{-2,824 \cdot 0,75}}{1,12576} = \frac{0,3556}{1,12576} = 0,316.$$

Слично, имајќи предвид дека е кабелот „долг“, со помош на (8.15) можеме да ја пресметаме приближната вредност на влезната импеданција на кабелот:

$$\underline{Z}_{vl} \approx \underline{Z}_C = (0,612 + j0,434) \Omega = 0,75 \cdot e^{j35,4^\circ} \Omega.$$

Гледаме дека последната вредност за \underline{Z}_{vl} , пресметана приближно, со помош на релацијата (8.15), се разликува само за 3% во однос на точната вредност за \underline{Z}_{vl} , добиена со егзактната релација (8.11).

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 (8.8) и (8.9):

$$\underline{Z}_P = \underline{Z}_C \cdot \operatorname{sh} \underline{\gamma} l = (-0,6211 + j2,0713) = 2,162 \cdot e^{j106,7^\circ} \Omega;$$

$$\underline{Y}_P = \frac{\operatorname{ch} \underline{\gamma} l - 1}{\underline{Z}_C \cdot \operatorname{sh} \underline{\gamma} l} = 1,185 \cdot e^{-j16,3^\circ} \text{ S}.$$



Пример 8.2. Да се пресмета вредноста на влезната импеданција \underline{Z}_{vl} на кабелот од претходниот пример (8.1) за случајот кога неговата челична арматура е во заситена состојба така што неговата подолжна импеданција изнесува $\underline{z} = (0,7 + j0,7) \Omega/\text{km}$. Колкав ќе биде коефициентот на изнесениот потенцијал \underline{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, подолжната импеданција на кабелот се намалува од вредноста $\underline{z} = (0,7 + j2) \Omega/\text{km}$ на вредноста $\underline{z} = (0,7 + j0,7) \Omega/\text{km}$. Се разбира дека поради тоа ќе дојде до промена на сите параметри на кабелот, па според тоа ќе се промени и неговата влезна импеданција \underline{Z}_{vl} .

Со повторни пресметки, на начин што е сосема идентичен на оној од претходниот пример, сега ќе добиеме:

$$\underline{Z}_{vl} = 0,535 \cdot e^{j16,4^\circ} \Omega; \quad \underline{k}_i = 0,469 \cdot e^{-j30,8^\circ}.$$

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 Z_{vl} на кабелот од задачата (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 ТССН/НН приклучена на неговиот крај, и тоа за следните вредности на R_2 (Ω): 0.5; 1; 3; 5; 10 и 100 Ω .

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, се добиваат следните резултати, прикажани во табелата 1.

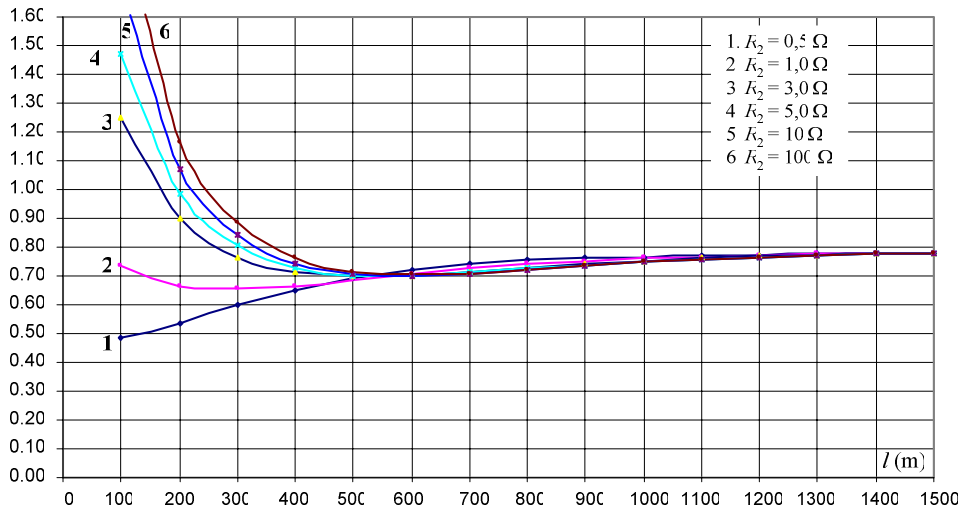
Табела 1. Табеларен приказ на зависностите $Z_{vl}(l)$ и $\varphi(l)$

l (m)	Зависност $Z_{vl}(l)$ (Ω)						Зависност $\arg\{Z_{vl}\} = \varphi(l)$ ($^\circ$)					
	$R_2=0.5 \Omega$	$R_2=1.0 \Omega$	$R_2=3 \Omega$	$R_2=5 \Omega$	$R_2=10 \Omega$	$R_2=100 \Omega$	$R_2=0.5 \Omega$	$R_2=1.0 \Omega$	$R_2=3 \Omega$	$R_2=5 \Omega$	$R_2=10 \Omega$	$R_2=100 \Omega$
100	0.488	0.734	1.248	1.473	1.708	2.002	19.1	10.9	4.7	3.5	2.7	1.9
200	0.538	0.665	0.901	0.988	1.071	1.164	30.2	20.1	11.1	9.2	7.8	6.5
300	0.599	0.655	0.764	0.805	0.842	0.883	35.5	26.9	17.9	15.8	14.2	12.7
400	0.652	0.667	0.711	0.729	0.746	0.764	37.6	31.3	24.0	22.1	20.6	19.1
500	0.694	0.688	0.697	0.703	0.709	0.717	37.9	33.9	28.6	27.2	26.0	24.8
600	0.723	0.709	0.702	0.702	0.703	0.705	37.6	35.2	31.8	30.8	29.9	29.1
700	0.742	0.728	0.715	0.712	0.711	0.709	37.0	35.8	33.8	33.2	32.6	32.1
800	0.755	0.742	0.729	0.726	0.723	0.721	36.4	35.9	34.9	34.5	34.2	33.9
900	0.762	0.753	0.742	0.739	0.737	0.735	36.0	35.9	35.4	35.3	35.1	34.9
1000	0.767	0.761	0.753	0.751	0.749	0.747	35.7	35.8	35.7	35.6	35.5	35.5
1100	0.771	0.767	0.762	0.760	0.759	0.758	35.5	35.6	35.7	35.7	35.7	35.7
1200	0.774	0.772	0.769	0.768	0.767	0.766	35.4	35.5	35.6	35.7	35.7	35.7
1300	0.777	0.776	0.774	0.773	0.773	0.772	35.3	35.5	35.6	35.6	35.6	35.6
1400	0.779	0.779	0.778	0.778	0.777	0.777	35.3	35.4	35.5	35.5	35.6	35.6
1500	0.782	0.782	0.781	0.781	0.781	0.781	35.3	35.4	35.4	35.5	35.5	35.5

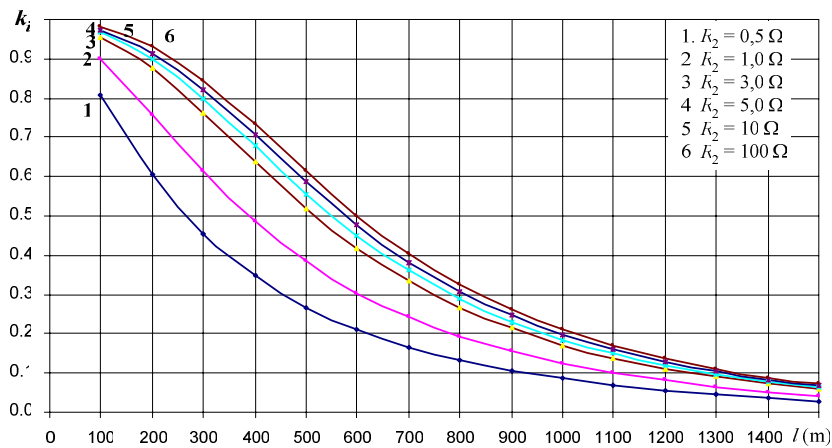
Табела 2. Табеларен приказ на зависноста на коефициентот на изнесениот потенцијал $k_i(l)$

l (m)	$R_2=0.5 \Omega$	$R_2=1.0 \Omega$	$R_2=3 \Omega$	$R_2=5 \Omega$	$R_2=10 \Omega$	$R_2=100 \Omega$
100	0.808	0.898	0.956	0.967	0.975	0.981
200	0.608	0.757	0.875	0.898	0.915	0.930
300	0.455	0.612	0.763	0.797	0.822	0.845
400	0.346	0.486	0.639	0.677	0.707	0.734
500	0.268	0.384	0.521	0.557	0.586	0.614
600	0.211	0.303	0.418	0.450	0.476	0.502
700	0.167	0.241	0.334	0.361	0.383	0.404
800	0.133	0.192	0.267	0.289	0.307	0.324
900	0.107	0.154	0.214	0.231	0.246	0.260
1000	0.086	0.124	0.172	0.186	0.197	0.209
1100	0.069	0.100	0.138	0.150	0.159	0.168
1200	0.056	0.080	0.112	0.121	0.128	0.136
1300	0.045	0.065	0.090	0.097	0.104	0.110
1400	0.037	0.053	0.073	0.079	0.084	0.089
1500	0.030	0.043	0.059	0.064	0.068	0.072

Зависноста на коефициентот на изнесениот потенцијал $k_i(l)$ е прикажана во табелата 2. На сликите 1 и 2 се прикажани овие зависимости во графички облик.



Слика 1. Зависност $Z_{v,l}(l)$ за кабел тип IPO 13 3×95 6/10 со разни вр. на параметарот R_2



Слика 2. Зависност $k_i(l)$ за кабел тип IPO 13 3×95 6/10 со разни вр. на параметарот R_2



Пример 8.4. Повторно се посматра кабелот од задачата (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:

Зависностите $U(x)$ и $I(x)$ по должината на плаштот од кабелот за време на земјоспојот ќе ги пресметаме со помош на релациите (8.4.1), т.е. релациите (8.5a):

$$\begin{aligned} \underline{U}(x) &= \underline{U}_2 \cdot \text{ch } \underline{\gamma}(l-x) + \underline{Z}_C \cdot \underline{I}_2 \cdot \text{sh } \underline{\gamma}(l-x), \\ \underline{I}(x) &= \frac{\underline{U}_2}{\underline{Z}_C} \cdot \text{sh } \underline{\gamma}(l-x) + \underline{I}_2 \cdot \text{ch } \underline{\gamma}(l-x). \end{aligned} \quad (1)$$

или, пак, со помош на следните релации, во кои фигурираат приликите на почетокот од кабелот \underline{U}_1 и \underline{I}_1 :

$$\begin{aligned} \underline{U}(x) &= \underline{U}_1 \cdot \text{ch } \underline{\gamma}x - \underline{Z}_C \cdot \underline{I}_1 \cdot \text{sh } \underline{\gamma}x; \\ \underline{I}(x) &= -\frac{\underline{U}_1}{\underline{Z}_C} \cdot \text{sh } \underline{\gamma}x + \underline{I}_1 \cdot \text{ch } \underline{\gamma}x. \end{aligned} \quad (2)$$

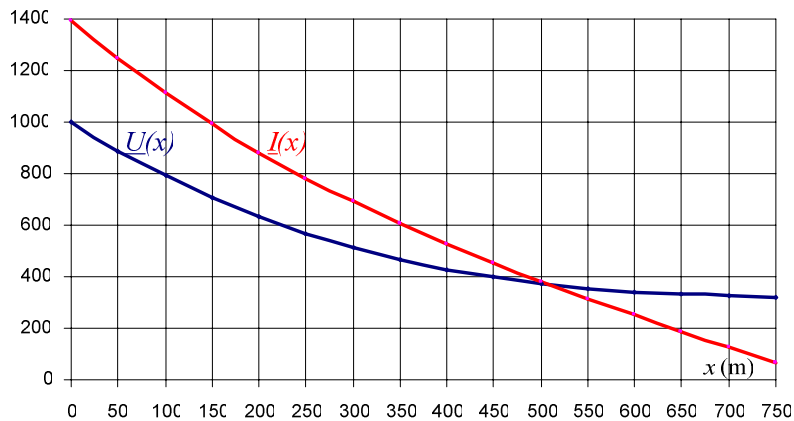
Значи за да можеме директно да ги примениме последните релации ќе треба да ја пресметаме уште струјата \underline{I}_1 . Неа ќе ја добиеме од односот:

$$\underline{I}_1 = \frac{\underline{U}_1}{\underline{Z}_{vl}} = \frac{1000}{0,719 \cdot e^{j34^\circ}} = (1154 - j777,1) = 1391,3 \cdot e^{-j34^\circ} \text{ A}.$$

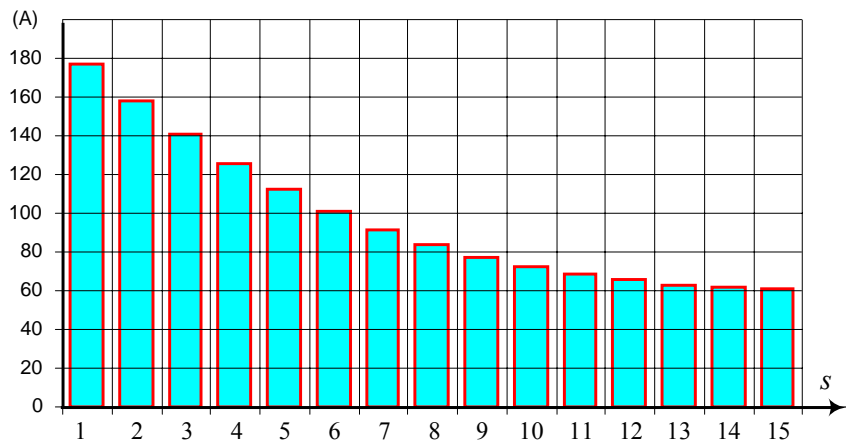
Сега со директна замена на вредностите за \underline{U}_1 и \underline{I}_1 во (1), за разни вредности на координатата x (растојание од почетокот на кабелот), ќе ја добиеме табелата 1. Врз основа на оваа табела се формирани кривите од слика 1 на која се прикажани зависностите $U(x)$ и $I(x)$. На сл. 2 е прикажана зависноста $J_0(s)$ на струјата на одведување во земја од поедините сегменти s ($s = 1, 15$) на плаштот од кабелот чии должини изнесуваат по 50 m. Во неа со $s = 1$ е означен првиот сегмент на кабелот ($0 \leq x \leq 50$ m), со $s = 2$ е означен вториот ($50 \leq x \leq 100$ m) итн.

Табела 1. Зависност $U(x)$, $I(x)$ и $J_0(x)$ по должината на кабелот

x (m)	0	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500	550	600	650	700	750
$U(x)$	1000	889	791	705	630	566	511	465	427	397	373	355	342	332	326	323
$I(x)$	1391.3	1243.4	1110.4	990.4	881.5	782.1	690.8	606.3	527.4	453.3	382.9	315.5	250.6	187.4	125.6	64.6
$J_0(x)$	177.4	157.8	140.5	125.4	112.3	101.1	91.6	83.7	77.3	72.3	68.4	65.4	63.3	61.9	61.0	/



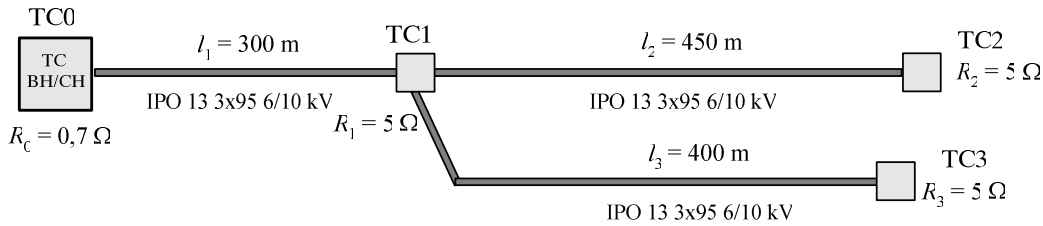
Слика 1. Распределба на напонот $U(x)$ и струјата $I(x)$ по должината на кабелот



Слика 2. Струја на одведување во земјата $J_0(x)$ од поедините сегменти



Пример 8.5. Во кабелската делница долга $l = 750$ m (слика 1 од примерот 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 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 1. 10 kV кабелска мрежа и модел на нејзиниот заземјувачки систем

Решение:

Со помош на изразите (8.8) и (8.9) 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 1.

Табела 1. Параметри на π -заменските шеми на одделните кабелски секции од мрежата

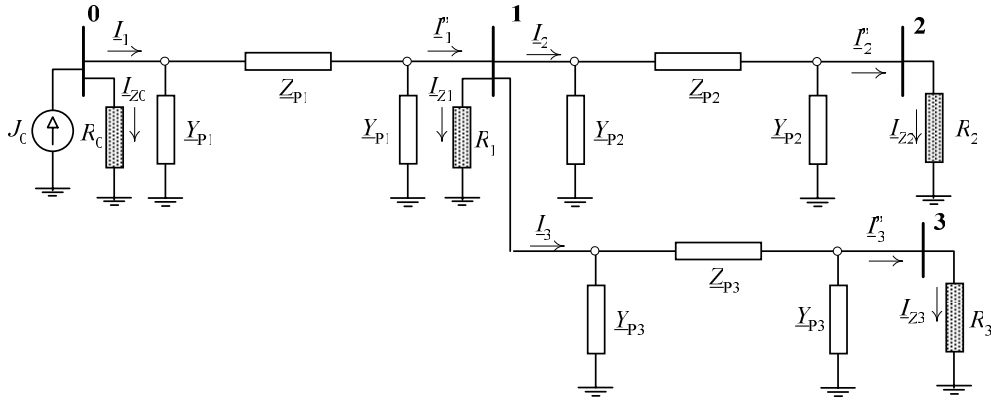
Секција	должина	$\underline{Z}_P(\Omega)$	$\underline{Z}_P(\Omega)$	$\underline{Y}_P(S)$	$\underline{Y}_P(S)$
TC0 – TC1	300 m	(0,14034+j0,65136)	$0,66631 \cdot e^{j77,8}$	(0,61750-j0,0379)	$0,61866 \cdot e^{-j3,5}$
TC1 – TC2	450 m	(0,08167+j1,05700)	$1,06015 \cdot e^{j85,6}$	(0,84507-j0,10671)	$0,851775 \cdot e^{-j7,2}$
TC1 – TC3	400 m	(0,11637+j0,91395)	$0,92133 \cdot e^{j82,7}$	(0,77440-j0,07954)	$0,77847 \cdot e^{-j5,9}$

Покрај тоа со помош на изразите (8.11) и (8.10) 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:

$$l_2 = 450 \text{ m}; R_2 = 5 \Omega; \underline{Z}_{vl.2} = (0,64594 + j0,29855) = 0,7116 \cdot e^{j24,8^\circ} \Omega; k_{i.2} = 0,616 \cdot e^{-j42,4^\circ}$$

$$l_3 = 400 \text{ m}; R_3 = 5 \Omega; \underline{Z}_{vl.3} = (0,67522 + j0,27401) = 0,72870 \cdot e^{j22,1^\circ} \Omega; k_{i.3} = 0,677 \cdot e^{-j36,6^\circ}$$

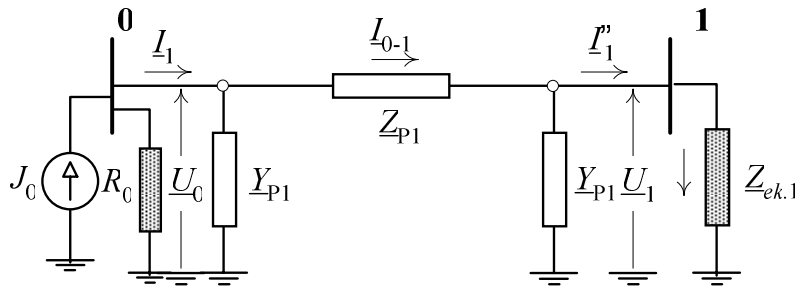
На сликата 2 е прикажано електричното коло со кое е претставен заземјувачкиот систем на набљудуваната кабелска мрежа. Во него секоја кабелска секција е претставена со соодветната π -еквивалентна шема, додека секој заземјувач во поедините ТС е прикажан со неговата отпорност на распростирање. Во колото на ЗС фигурира и струјниот генератор J_Z со кој што се моделира струјата на земјоспојот.



Слика 2. Заземјувачки систем на 10 kV кабелска мрежа

Врз основа на сликата 2 можеме да ја формираме упростената варијанта на посматраниот ЗС (сл.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 $Z_{ek.1}$. Нејзината вредност, во согласност со слика 2, ќе ја добиеме на следниот начин:

$$\underline{Z}_{ek.1} = \underline{Z}_{vl.2} \parallel \underline{Z}_{vl.3} \parallel R_1 = (0,31327 + j0,12607) = 0,33768 \cdot e^{j21,9^\circ} \Omega.$$



Слика 3. Упростена варијанта на заземјувачкиот систем на 10 kV кабелска мрежа

Сега со помош на изразите (8.11) и (8.10) ќе ги пресметаме влезната импеданција $Z_{vl.1}$ и коефициентот на изнесување на потенцијалот на првата секција $k_{i.1}$:

$$\underline{Z}_{vl.1} = \underline{Z}_C \cdot \frac{\text{ch } \underline{\gamma} l_1 + \frac{\underline{Z}_C}{\underline{Z}_{ek.1}} \cdot \text{sh } \underline{\gamma} l_1}{\text{sh } \underline{\gamma} l_1 + \frac{\underline{Z}_C}{\underline{Z}_{ek.1}} \cdot \text{ch } \underline{\gamma} l_1} = (0,46317 + j0,41965) = 0,62501 \cdot e^{j42,2^\circ} \Omega,$$

$$k_{i.1} = \left(\text{ch } \underline{\gamma} l_1 + \frac{\underline{Z}_C}{\underline{Z}_{ek.1}} \cdot \text{sh } \underline{\gamma} l_1 \right)^{-1} = (0,24523 - j0,22466) = 0,3326 \cdot e^{-j42,5^\circ}; \quad |k_{i.1}| = \frac{U_1}{U_0} = 0,3326$$

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 J_0 :

$$\underline{Z}_{ek} = R_0 \prod \underline{Z}_{vl.1} = 0,7 \prod 0,62501 \cdot e^{j42,2^\circ} = 0,35381 \cdot e^{j22,34^\circ} \Omega.$$

$$\underline{J}_0 = (1000 + j0) \text{ A}; \quad \underline{U}_0 = \underline{Z}_{ek} \cdot \underline{J}_0 = 353,81 \cdot e^{j22,34^\circ} \text{ V}.$$

Сега можеме да ги пресметаме и останатите напони и струи во заземјувачкиот систем:

$$\underline{I}_1 = \frac{\underline{U}_0}{\underline{Z}_{ek}} = \frac{353,81 \cdot e^{j22,34^\circ}}{0,62501 \cdot e^{j42,2^\circ}} = 566,084 \cdot e^{-j19,86^\circ} \text{ A};$$

$$\underline{U}_1 = \underline{k}_{i,1} \cdot \underline{U}_0 = 0,3326 \cdot e^{-j42,5^\circ} \cdot 353,81 \cdot e^{j22,34^\circ} = 117,7 \cdot e^{-j20,16^\circ} \text{ V};$$

$$\underline{I}_2 = \frac{\underline{U}_1}{\underline{Z}_{vl,2}} = \frac{117,7 \cdot e^{-j20,16^\circ}}{0,7116 \cdot e^{j24,8^\circ}} = 165,4 \cdot e^{-j44,96^\circ} \text{ A};$$

$$\underline{U}_2 = \underline{k}_{i,2} \cdot \underline{U}_1 = 0,616 \cdot e^{-j42,4^\circ} \cdot 117,7 \cdot e^{j22,34^\circ} = 72,5 \cdot e^{-j20,06^\circ} \text{ V};$$

$$\underline{I}_3 = \frac{\underline{U}_1}{\underline{Z}_{vl,3}} = \frac{117,7 \cdot e^{-j20,16^\circ}}{0,7287 \cdot e^{j22,1^\circ}} = 161,5 \cdot e^{-j42,26^\circ} \text{ A};$$

$$\underline{U}_3 = \underline{k}_{i,3} \cdot \underline{U}_1 = 0,677 \cdot e^{-j36,6^\circ} \cdot 117,7 \cdot e^{j22,34^\circ} = 79,7 \cdot e^{-j14,26^\circ} \text{ V}.$$

Струите што се одведуваат од поедините заземјувачи во мрежата ќе бидат:

$$I_{Z0} = U_0 / R_0 = 353,81 / 0,7 = 505,44 \text{ A};$$

$$I_{Z1} = U_1 / R_1 = 117,7 / 5 = 23,54 \text{ A};$$

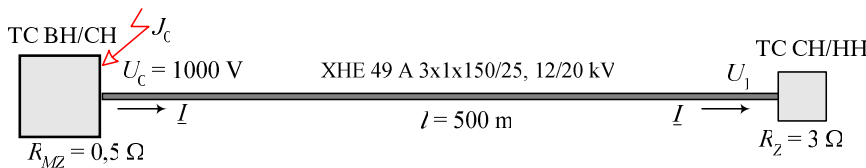
$$I_{Z2} = U_2 / R_2 = 72,5 / 5 = 14,5 \text{ A};$$

$$I_{Z3} = U_3 / R_3 = 79,7 / 5 = 15,94 \text{ A}.$$

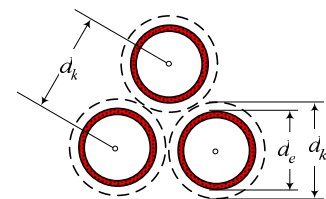


Пример 8.6. Трифазен кабелски вод со полиетиленска изолација, тип ХНЕ 49 А 3×1×150/25 12/20 kV, напојува ТС СН/НН (слика 1). Должината на кабелот изнесува $l = 500 \text{ m}$. Жилите на кабелот се сместени во кабелски ров на длабочина $h = 0,7 \text{ m}$ во формација триаголник. Надворешниот механички пречник на секоја жила изнесува $d_k = 3 \text{ cm}$. Секоја жила над изолацијата 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 $d_e = 2,5 \text{ cm}$. Растојанието помеѓу оските на таквите шупливи цевки изнесува d_k (слика 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 1. Кабел со изолиран метален плашт, тип ХНЕ 49 А



Слика 2. Диспозиција на кабелските жили

Решение:



Слика 3. Конструкција на каблите од типот ХНЕ 49 А 3×1×150/25 12/20 kV

Каблите од типот тип ХНЕ 49 А 150/25 12/20 kV, како што е тоа прикажано на сликата 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 антикорозивен и плашт кој го спречува продорот на влагата и другите штетни материи во неговата внатрешност од средината во која што е поставен кабелот.

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 попречни 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.:

$$\underline{Z}_P = \underline{Z} = \underline{z} \cdot l = (r + jx) \cdot l; \quad \underline{Y}_P = 0.$$

Подолжната импеданција на кабелот \underline{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:

$$r_{Cu} = \frac{1000}{\kappa_{Cu} \cdot \Sigma S_{Cu}} = \frac{1000 \cdot \rho_{Cu}}{\Sigma S_{Cu}} = \frac{18}{3 \cdot 25} = 0,24 \frac{\Omega}{\text{km}};$$

$$r = r_z + r_{Cu} = 0,05 + 0,24 = 0,29 \frac{\Omega}{\text{km}}.$$

Притоа, во согласност со релацијата (7.?), $r_z = 0,05 \frac{\Omega}{\text{km}}$

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:

$$D_s = \sqrt[3]{(d_e/2)^3 \cdot d_k^6} = \sqrt[3]{(d_e/2) \cdot d_k^2} = \sqrt[3]{1,25 \cdot 3^2} = 2,241 \text{ cm} = 0,02241 \text{ m} .$$

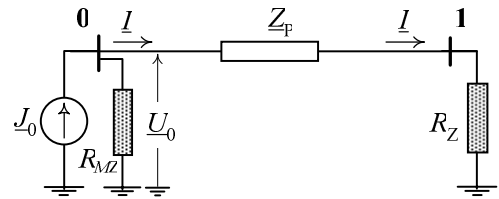
Реактанцијата x по единица должина на кабелскиот сноп ќе биде:

$$x = 0,1445 \cdot \log \frac{D_e}{D_s} = 0,1445 \cdot \log \frac{930,6}{0,02241} = 0,668 \frac{\Omega}{\text{km}} ;$$

$$D_e = 658 \cdot \sqrt{\rho/f} = 658 \cdot \sqrt{100/50} = 930,6 \text{ m} ;$$

$$\underline{z} = (r + jx) = (0,29 + j0,668) = 0,728 \cdot e^{j66,5^\circ} \frac{\Omega}{\text{km}} ;$$

$$\underline{Z} = \underline{z} \cdot l = (0,145 + j0,334) \Omega ; \quad \underline{Z}_P = \underline{Z}$$



Слика 4. Еквив. коло на заз. систем

Сега врз основа на сликата 4 можеме да ги пресметаме потребните величини:

$$\underline{U}_1 = \frac{R_Z}{\underline{Z}_P + R_Z} \cdot \underline{U}_0 = \frac{3}{3,145 + j0,334} \cdot 1000 = (943,3 - j100,1) = 948,6 \cdot e^{-j6,1^\circ} \text{ V} ;$$

$$\underline{I} = \frac{\underline{U}_0}{\underline{Z}_P + R_Z} = \frac{1000}{3,145 + j0,334} = (314,4 - j33,4) = 316,2 \cdot e^{-j6,1^\circ} \text{ A} .$$

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 J_0 , според сликите 1 и 4, ќе биде:

$$\underline{J}_0 = \underline{I}_{MZ} + \underline{I} = \frac{\underline{U}_0}{R_{MZ}} + \underline{I} = \frac{1000}{0,5} + (314,4 - j33,4) = (2314,4 - j33,4) = 2315 \cdot e^{-j0,83^\circ} \text{ A} .$$

■ ■ ■

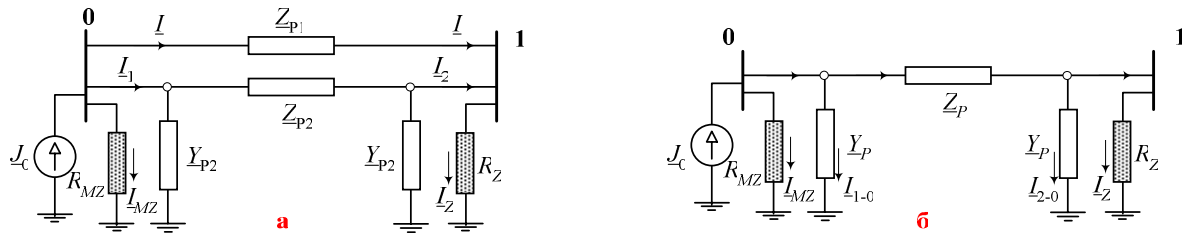
Пример 8.7. Заради подобрување на перформансите на заземјувачкиот систем, во кабелскиот ров од кабелот во претходниот пример се предвидува, на длабочина $h = 0,7 \text{ m}$, да се постави бакарно јаже со пресек $S_{Cu} = 35 \text{ mm}^2$ и пречник $d_{Cu} = 7,5 \text{ mm}$. Обата краја од бакарното јаже 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, $J_0 = 2315 \text{ A}$. За новите услови на работа да се пресметаат:

- напоните \underline{U}_0 и \underline{U}_1 на заземјувачите во ТС ВН/СН и ТС СН/НН;
- вкупната струја \underline{I} што се одведува преку електричните заштити на кабелскиот вод;
- струјата \underline{I}_1 на почетокот и струјата \underline{I}_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 сликата 1. 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 1. Еквиваленто коло на посматраниот заземјувачки систем

Параметрите на π -заменската шема на кабелот Z_{P1} и Y_{P1} се веќе пресметани во претходниот пример 8.6 и изнесуваат: $Z_{P1} = Z = z \cdot l = (0,145 + j0,334) \Omega$ и $Y_{P1} = 0$.

Параметрите Z_{C2} , Z_{P2} и 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:

$$Z_{C2} = (0,450 + j0,209) = 0,496 \cdot e^{j24,9^\circ} \Omega;$$

$$Z_{P2} = (0,271 + j0,391) = 0,475 \cdot e^{j55,3^\circ} \Omega;$$

$$Y_{P2} = (0,851 - j0,0397) = 0,852 \cdot e^{-j2,7^\circ} \Omega;$$

Бидејќи двата четворокрајника се паралелно врзани, тие можат да се еквивалентираат со еден единствен, со параметри Z_P и Y_P , каде што е:

$$Y_P = Y_{P2} = (0,851 - j0,0397) = 0,852 \cdot e^{-j2,7^\circ} \Omega;$$

$$Z_P = Z_{P1} \Pi Z_{P2} = (0,145 + j0,334) \Pi (0,271 + j0,391)$$

$$Z_P = (0,0984 + j0,1822) = 0,207 \cdot e^{j61,6^\circ} \Omega.$$

За да го решиме електричното коло од сликата 1 б најнапред ќе ги пресметаме еквивалентите адмитанции Y_1 и Y_2 на почетокот и крајот од четворокрајникот:

$$Y_1 = Y_P + R_{MZ}^{-1} = (2,851 - j0,04) = 2,851 \cdot e^{-j0,8^\circ} S;$$

$$Y_2 = Y_P + R_Z^{-1} = (1,184 - j0,04) = 1,185 \cdot e^{-j1,9^\circ} S.$$

Сега можеме да ја пресметаме еквивалентната (влезната) импеданција во јазелот 0, Z_{ek} :

$$Z_{ek} = [Y_1 + (Z_P + 1/Y_2)^{-1}]^{-1} = (0,258 + j0,018) = 0,258 \cdot e^{j3,9^\circ} \Omega.$$

Ако позната струја на грешка J_0 ја ставиме на фазната оска, .т.е. усвоиме дека е $J_0 = (2315 + j0) A$ тогаш напонот U_0 во јазелот 0 ќе биде:

$$U_0 = Z_{ek} \cdot J_0 = (596,6 + j41,04) = 598,0 \cdot e^{j3,9^\circ} V$$

Напонот U_1 во јазелот 1 ќе биде:

$$\underline{U}_1 = \underline{U}_0 \cdot \frac{1/Y_2}{Z_P + 1/Y_2} = \frac{\underline{U}_0}{1 + Z_P \cdot Y_2} = (519,32 - j61,4) = 522,9 \cdot e^{-j6,7^\circ} \text{ V}.$$

Струите во одделните елементи од заземјувачкиот систем ќе бидат:

- струја на одведување од мрежестиот заземјувач во ТС ВН/СН: $\underline{I}_{MZ} = \frac{\underline{U}_0}{R_{MZ}} = 1196,0 \cdot e^{j3,9^\circ} \text{ A}$
- струја на одведување од заземјувачот на ТС СН/НН: $\underline{I}_Z = \frac{\underline{U}_1}{R_Z} = 174,3 \cdot e^{-j6,7^\circ} \text{ A};$
- вк. струја на одведување преку ел. заштита на кабелот: $\underline{I} = \frac{\underline{U}_0 - \underline{U}_1}{Z_{P1}} = 352,6 \cdot e^{-j13,5^\circ} \text{ A};$
- струја на одведување на почетокот од бакарното јаже: $\underline{I}_{Cu,1} = \underline{J}_0 - \underline{I} - \underline{I}_{MZ} = 779 \cdot e^{j0,0^\circ} \text{ A};$
- струја на одведување од заземјувачот на ТС СН/НН: $\underline{I}_{Cu,2} = \underline{I}_Z - \underline{I} = 181 \cdot e^{j160,0^\circ} \text{ A}.$

Забележуваме дека напонските прилики во заземјувачкиот систем во овој случај се значително 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 I 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}_Z на крајот од бакарното јаже изнесува 160° што значи дека вистинската насока на оваа струја е обратна од означената на сликата 1.б. 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.



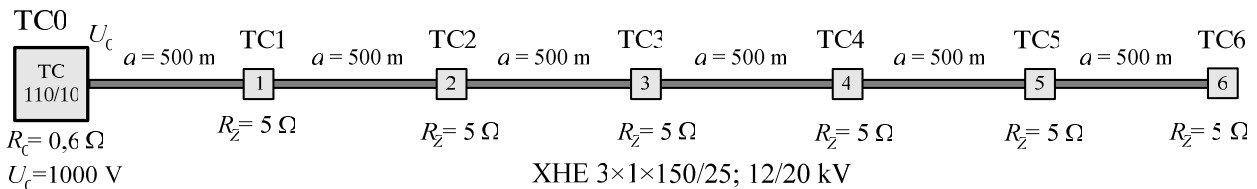
Задача 8.2. Да се реши примерот 8.7 за случај кога Си-јаже не е галвански поврзано со заземјувачот на ТС СН/НН својот крај.



Пример 8.8. 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 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 U_k ($k = 1, n$) 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 извезува $t = 0,5$ s.



Слика 1. 10 kV кабелски извод со $n = 6$ 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) од учебникот. Врз основа на изразите (8.21) можеме да пишуваме:

$$\underline{U}_0 = \underline{U}_n \operatorname{ch} n \underline{g} + \underline{I}_n \underline{Z}_c \operatorname{sh} n \underline{g}$$

$$\underline{I}_0 = \frac{\underline{U}_n}{\underline{Z}_c} \operatorname{sh} n \underline{g} + \underline{I}_n \operatorname{ch} n \underline{g}$$

каде што, во согласност со сликата 1 и релациите (8.22) и (8.23) имаме:

$$\underline{Z} = \underline{z} \cdot a = (0,145 + j,0,334) \Omega \text{ (видете го примерот 8.6)}$$

$$\frac{\underline{Z}}{R_Z} = \underline{\lambda} = \frac{0,145 + j0,334}{5} = (0,0266 + j0,0668) = 0,0719 \cdot e^{j68,3^\circ};$$

$$\underline{g} = \ln \left[1 + \underline{\lambda} + \sqrt{2 \cdot \underline{\lambda} + \underline{\lambda}^2} \right] = (0,31430 + j0,21063) = 0,37835 \cdot e^{j33,8^\circ}.$$

$$\underline{Z}_c = \frac{\underline{Z}}{\sqrt{2 \cdot \underline{\lambda} + \underline{\lambda}^2}} = (0,78785 + j0,51555) = 0,94154 \cdot e^{j33,2^\circ} \Omega.$$

$$e^{n \underline{g}} = (1,99217 + j6,28348) = 6,59172 \cdot e^{j72,4^\circ};$$

$$\operatorname{ch}(n \underline{g}) = \frac{e^{n \underline{g}} + e^{-n \underline{g}}}{2} = (0,97316 + j3,21404) = 3,35814 \cdot e^{j73,2^\circ};$$

$$\operatorname{sh}(n \underline{g}) = \frac{e^{n \underline{g}} - e^{-n \underline{g}}}{2} = (1,01901 + j3,06943) = 3,23416 \cdot e^{j71,6^\circ}$$

Со оглед на тоа дека е $\underline{I}_n = 0$, врз основа на првата равенка од (8.21) ќе добиеме:

$$\underline{U}_n \equiv \underline{U}_6 = \frac{\underline{U}_0}{\text{ch}(ng)} = \frac{1000}{3,23416} \cdot e^{-j71,6^\circ} = 309,2 \cdot e^{-j71,6^\circ} \text{ V},$$

додека врз основа на втората равенка од (8.21) ќе добиеме:

$$\underline{I}_0 = \frac{\underline{U}_n}{\underline{Z}_c} \text{sh } ng = (938,49 - j579,16) = 1102,8 \cdot e^{-j31,7^\circ} \text{ A}.$$

Сега можеме да ја пресметаме "влезната" импеданција на изводот:

$$\underline{Z}_{VL} = \frac{\underline{U}_0}{\underline{I}_0} = (0,77166 + j0,47621) = 0,9068 \cdot e^{j31,7^\circ} \Omega.$$

Напоните \underline{U}_k ($k = 1, 5$) на заземјувачите кај оделните ТС СН/НН ќе ги добиеме со помош на изразот (8.25):

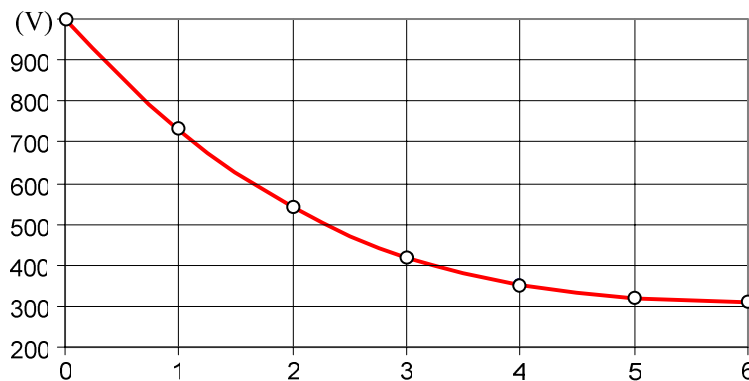
$$\underline{U}_k = \underline{U}_n \cdot \text{ch}(n-k) \cdot \underline{g} = \frac{\underline{U}_0}{\text{ch}(ng)} \cdot \text{ch}(n-k) \cdot \underline{g}; \quad k = 1, n.$$

На тој начин за напоните ќе ги добиеме следните вредности во (V):

Табела 1. Распределба на напоните (V) на заземјувачите по поедините ТС СН/НН

\underline{U}_0	\underline{U}_1	\underline{U}_2	\underline{U}_3	\underline{U}_4	\underline{U}_5	\underline{U}_6
$1000,0 \cdot e^{j0,0^\circ}$	$728,4 \cdot e^{-j13,5^\circ}$	$540,3 \cdot e^{-j28,0^\circ}$	$419,1 \cdot e^{-j43,3^\circ}$	$350,2 \cdot e^{-j57,6^\circ}$	$318,1 \cdot e^{-j67,9^\circ}$	$309,2 \cdot e^{-j71,6^\circ}$

Распределбата на напоните на заземјувачите од ТС СН/НН по должината на изводот се прикажани на сликата 2.



Слика 2. Распределбата на напоните на заземјувачите на поедините ТС СН/НН по должината на изводот

Според нашите прописи, за времетраење на струјниот удар (грешката) од $t = 0,5 \text{ s}$, дозволеният 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 $U_1 = 728,4 \text{ V}$. Бидејќи максималната потенцијална разлика на чекор за нејзиниот заземјувач изнесува $E_{c.max} \% = 14\%$, ќе добиеме дека $E_{c.max} = 0,14 \cdot U_1 = 0,14 \cdot 728,4 = 102 \text{ V}$. Имајќи предвид дека специфичната отпорност на плото изнесува $\rho = 125 \Omega\text{m}$, за факторот на чекор s_c како и за најголемиот напон на допир ќе добиеме:

$$s_c = 1 + 6 \cdot \frac{\rho}{1000} = 1 + 6 \cdot \frac{125}{1000} = 1,75;$$

$$U_{c.\max} = \frac{E_{c.\max}}{s_c} = \frac{102}{1,75} = 58 \text{ V} < 80 \text{ V}.$$

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 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 8.9. Пресметките на извоз на потенцијалот 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 $h = 0,7 \text{ m}$.

Решение:

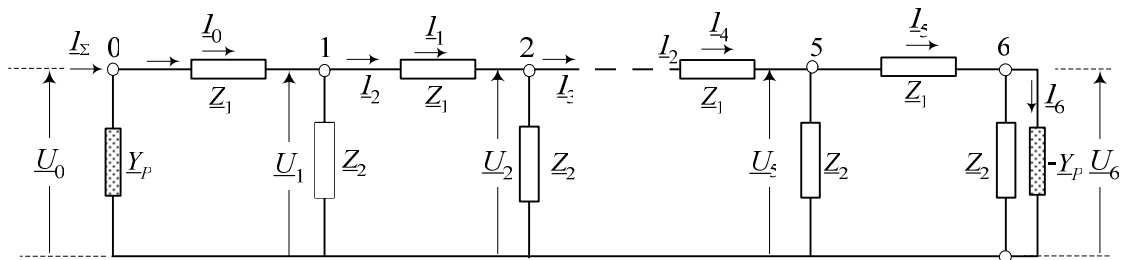
Во овој случај заменската шема на секоја секција од заземјувачкиот систем ќе се состои од еден π -четворокрајник со кој ќе биде опфатена паралелната комбинација три кабелски жили + бакарно јаже (слика 1 од примерот 8.7). Тој еквивалентен π -четворокрајник ќе ги има следните параметри \underline{Z}_P и \underline{Y}_P (видете го примерот 8.7):

$$\underline{Y}_P = (0,851 - j0,0397) = 0,852 \cdot e^{-j2,7^\circ} \Omega; \quad \underline{Z}_P = (0,0984 + j0,1822) = 0,207 \cdot e^{j61,6^\circ} \Omega.$$

Ќе го воведеме означувањето $\underline{Z}_1 = \underline{Z}_P = 0,207 \cdot e^{j61,6^\circ} \Omega$. Понатаму со \underline{Z}_2 ќе ја означиме паралелната комбинација:

$$\underline{Z}_2 = \frac{1}{\underline{Y}_P + (1/R_Z) + \underline{Y}_P} = \frac{R_Z}{1 + 2\underline{Y}_P \cdot R_Z} = (0,52489 + j0,0219) = 0,52534 \cdot e^{j2,4^\circ} \Omega.$$

Сега заземјувачкиот систем на кабелскиот извод ќе можеме да го претставиме со помош на сликата 1.



Слика 1. Приказ на заз. систем на кабелскиот извод како каскада од 6 четворополи

За решавањето на приликите во заземјувачкиот систем од сликата 1, ќе го примениме моделот од точка 8.3. Според релациите (8.21) ќе имаме:

$$n = 6;$$

$$\underline{U}_0 = \underline{U}_n \operatorname{ch} n \underline{g} + \underline{I}_n \underline{Z}_C \operatorname{sh} n \underline{g}$$

$$\underline{I}_0 = \frac{\underline{U}_n}{\underline{Z}_C} \operatorname{sh} n \underline{g} + \underline{I}_n \operatorname{ch} n \underline{g}$$

(1)

Дополнителни две релации се добиваат врз основа на самата слика 1:

$$\underline{I}_n = -\underline{Y}_P \cdot \underline{U}_n; \quad (2)$$

$$\underline{I}_\Sigma = \underline{I}_0 + \underline{Y}_P \cdot \underline{U}_0. \quad (3)$$

Во согласност со (8.22) и (8.23), параметрите \underline{g} и \underline{Z} на изводот кои фигурираат во системот равенки (1) се пресметуваат со помош на следните изрази:

$$\underline{g} = \ln \left[1 + \frac{\underline{Z}_1}{\underline{Z}_2} + \sqrt{2 \cdot \frac{\underline{Z}_1}{\underline{Z}_2} + \left(\frac{\underline{Z}_1}{\underline{Z}_2} \right)^2} \right] = (0,76928 + j0,41117) = 0,87226 \cdot e^{j28,1^\circ}. \quad (4)$$

$$\underline{Z}_C = \frac{\underline{Z}_1}{\sqrt{2 \cdot \frac{\underline{Z}_1}{\underline{Z}_2} + \frac{\underline{Z}_1^2}{\underline{Z}_2^2}}} = (0,19576 + j0,10252) = 0,22098 \cdot e^{j27,6^\circ} \Omega. \quad (5)$$

Врз основа на (8.9.1) и (8.9.2) се добива:

$$\underline{U}_0 = \underline{U}_n \cdot (\text{chng} - \underline{Z}_C \cdot \underline{Y}_P \cdot \text{shng});$$

$$\underline{U}_n = \frac{\underline{U}_0}{(\text{chng} - \underline{Z}_C \cdot \underline{Y}_P \cdot \text{shng})} = (-17,054 - j16,536) = 23,8 \cdot e^{-j135,9^\circ} \text{ kV}$$

$$\underline{I}_n = -\underline{Y}_P \cdot \underline{U}_n = (15,168 + j13,394) = 20,2 \cdot e^{j41,4^\circ} \text{ A}.$$

Во општ случај, напонот \underline{U}_k и струјата \underline{I}_k во k -тата делница ($k = 1, n$) можат да се пресметуваат со помош на следните општи изрази:

$$\underline{U}_k = \underline{U}_n \text{ch}(n-k) \cdot \underline{g} + \underline{I}_n \underline{Z}_C \text{sh}(n-k) \cdot \underline{g};$$

$$\underline{I}_k = \frac{\underline{U}_n}{\underline{Z}_C} \text{sh}(n-k) \cdot \underline{g} + \underline{I}_n \text{ch}(n-k) \cdot \underline{g}; \quad (6)$$

$$k = 1, 2, \dots, n.$$

На тој начин се добиваат следните резултати:

Табела 1. Распределба на напоните и "струите" по поедините делници од заз. систем

\underline{U}_0	\underline{U}_1	\underline{U}_2	\underline{U}_3	\underline{U}_4	\underline{U}_5	\underline{U}_6
$1000,0 \cdot e^{j0,0^\circ}$	$463,2 \cdot e^{-j23,5^\circ}$	$214,0 \cdot e^{-j47,1^\circ}$	$98,6 \cdot e^{-j71,3^\circ}$	$46,5 \cdot e^{-j97,9^\circ}$	$26,8 \cdot e^{-j126,3^\circ}$	$23,8 \cdot e^{-j135,9^\circ}$

\underline{I}_0	\underline{I}_1	\underline{I}_2	\underline{I}_3	\underline{I}_4	\underline{I}_5	\underline{I}_6
$4525,2 \cdot e^{-j27,7^\circ}$	$2097,2 \cdot e^{-j51,2^\circ}$	$974,4 \cdot e^{-j74,8^\circ}$	$454,4 \cdot e^{-j97,7^\circ}$	$207,8 \cdot e^{-j118,2^\circ}$	$75,7 \cdot e^{-j131,8^\circ}$	$20,2 \cdot e^{j41,4^\circ}$

Се разбира дека струите $\underline{I}_0, \underline{I}_1, \dots, \underline{I}_6$ се фиктивни струи што произлегуваат од моделот и се однесуваат на целата комбинација составена од Си-плаштови на жилите и Си-јаже. Вистинските струи \underline{I}_{i-j} во одделните делници на кабелскиот извод ќе се добијат врз основа на следната релација која што произлегува од примената на II Кирхофов закон:

$$\underline{I}_{i-j} = \frac{\underline{U}_i - \underline{U}_j}{\underline{Z}}; \quad i=1, 2, \dots, n-1; \quad j = i+1; \quad \underline{Z} = (0,145 + j0,334) = 0,36382 \cdot e^{j66,5^\circ} \Omega,$$

каде што со \underline{Z} е означена еквивалентата импеданција на трите бакарни заштити од кабелските жили.

Пресметките покажуваат дека тие струи се сосема мали и се движат во границите од 50,4 А во почетната делница до 0,5 А во крајната делница. Значи сето одведување на струјата се врши практично преку бакарното јаже.

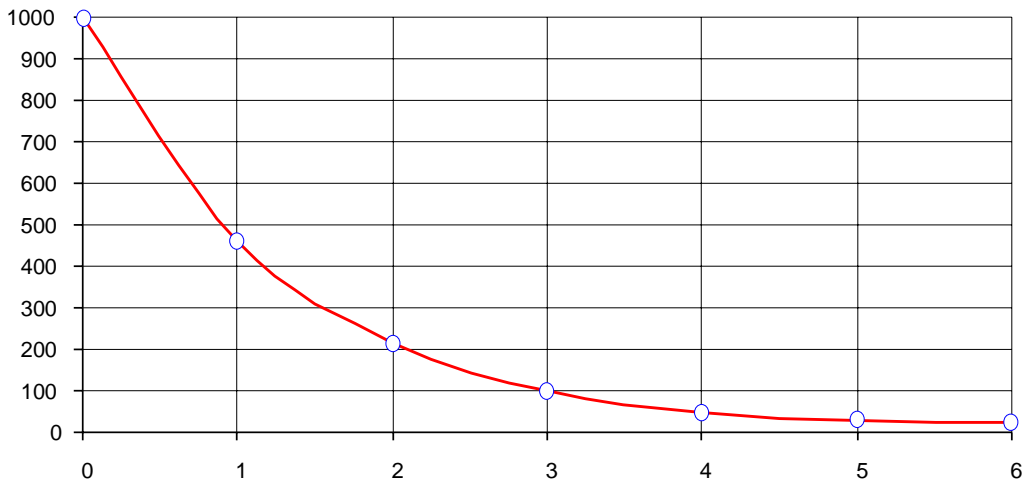
Сумарната струја I_{Σ} што ќе ја извлече изводот од ТС ВН/СН ќе биде:

$$I_{\Sigma} = I_0 + Y_P \cdot U_0 = (4859,1 - j2140,1) = 5309,5 \cdot e^{-j23,8^\circ} \text{ kA}.$$

Влезната импеданција на целиот извод ќе се добие како следниот однос:

$$Z_{VL\Sigma} = U_0 / I_{\Sigma} = (0,17236 + j0,07591) = 0,1883 \cdot e^{j23,8^\circ} \text{ k}\Omega.$$

Распределбата на напоните по поедините заземјувачи на ТС СН/НН по должината на изводот се прикажани графички на дијаграмот од сликата 2. Имајќи ги предвид анализите извршени во примерот 8.7, сосема е јасно дека опасности од превисоки напони на допир и чекор во околината на ТС СН/НН нема да постојат.

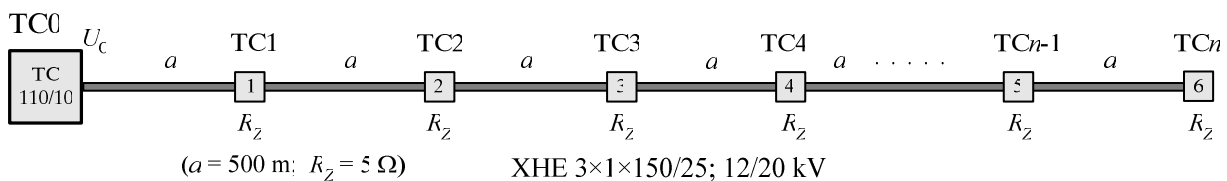


Слика 2. Распределбата на напоните на заземјувачите на поедините ТС СН/НН по должината на изводот



Пример 8.10. 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 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 $k_i(k)$; $k = 1, n$, за разни вредности на бројот n на напојуваните ТС СН/НН. Резултатите да се прикажат табеларно и графички.



Слика 1. Општ случај на 10 kV кабелски извод што напојува n ТС СН/НН

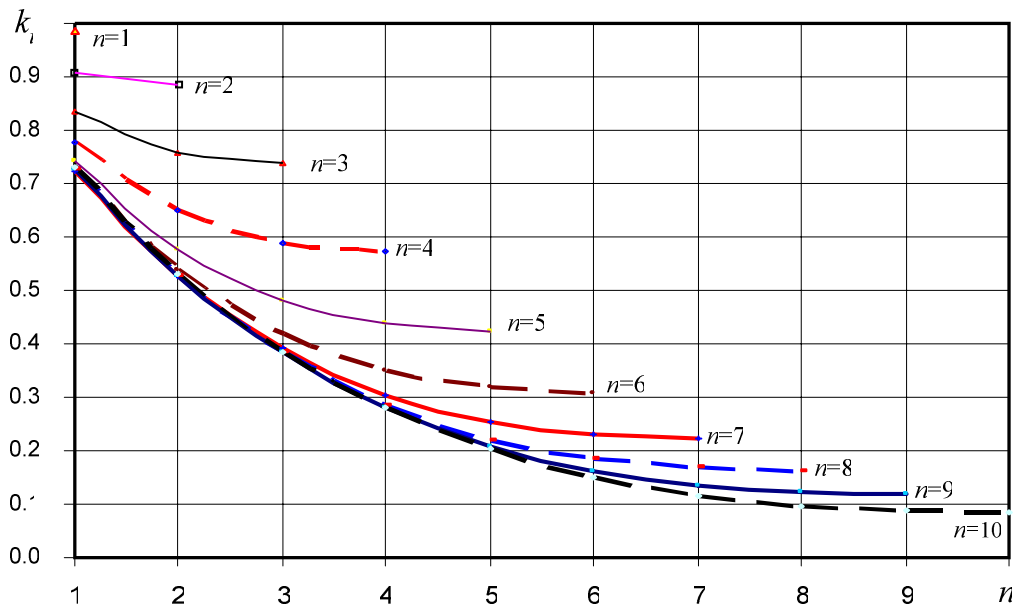
Решение:

На начин наполно ист како во примерот 8.8, со помош на релациите (8.27), се вршат пресметки на влезната импеданција Z_{VL} на кабелскиот извод посматран како елемент од заземјувачкиот систем – каскада од вкупно n -четворокрајници. Истовремено, со помош на изразите (8.26) се вршат и пресметки на коефициентите $k_i(k)$; ($k = 1, n$) на изнесениот потенцијал по должината на изводот. Овие пресметки се прават повеќе пати, за разни вредности на бројот n на напојуваните ТС СН/НН.

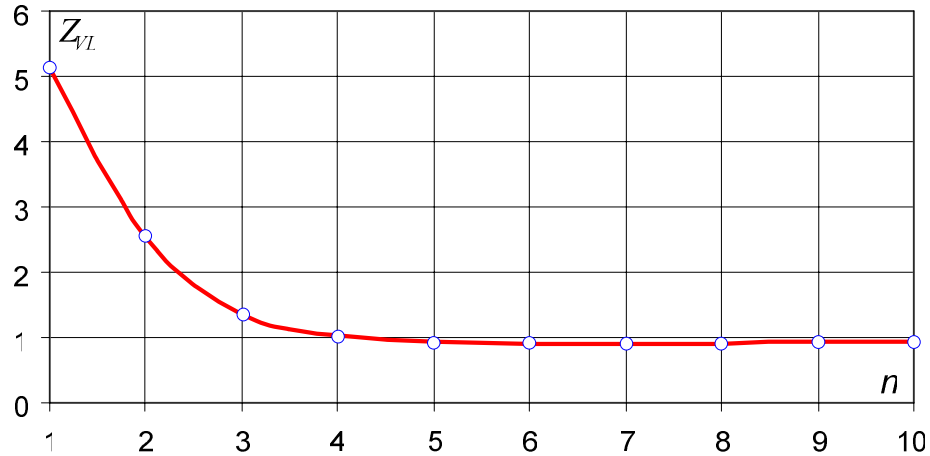
Резултатите од ваквата параметарска анализа се сместени во табелата 1 и сликите 2 и 3.

Табела 1. Табеларен приказ на резултатите од пресметките

n	Z_{VL} (Ω)	Распределба на коеф. 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	5,144	0,972	/								
2	2,537	0,908	0,883	/							
3	1,357	0,836	0,759	0,738	/						
4	1,030	0,776	0,648	0,589	0,572	/					
5	0,924	0,742	0,575	0,481	0,437	0,425	/				
6	0,901	0,728	0,540	0,419	0,350	0,318	0,309	/			
7	0,907	0,725	0,528	0,392	0,304	0,254	0,231	0,224	/		
8	0,919	0,726	0,527	0,384	0,285	0,221	0,184	0,168	0,163	/	
9	0,930	0,728	0,528	0,383	0,279	0,207	0,161	0,134	0,122	0,119	/
10	0,936	0,729	0,530	0,385	0,279	0,203	0,151	0,117	0,098	0,089	0,086



Слика 2. Распределба на коефициентот k_i по должината на изводот во зависност од бројот n на напојуваните ТС СН/НН



Слика 3. Зависност на влезната импеданција на изводот од бројот на ТС СН/НН



Задача 8.4. Се посматра 10 kV кабелски извод од примерот 8.10 (слика 1) 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 опрорност 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 $k_i(k)$; $k = 1, n$, за разни вредности на бројот n на напојуваните ТС СН/НН и во овој случај. Резултатите да се прикажат табеларно.

Решение:

Табела 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	0.161	0.557	/			
2	0.165	0.371	0.096	/		
3	0.166	0.376	0.065	0.017	/	
4	0.166	0.375	0.066	0.011	0.003	/
5	0.166	0.375	0.066	0.011	0.002	0.0005



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.

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.

Моделирање на надземните водови

Надземните водови со заштитно јазе 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. $Y_{P1} = Y_{P2} = Y_P$, (слика 7.3), а вредностите на неговите параметри Z_P и 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.

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 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 четворопол со кој се моделира јажето/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 -четворопол 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 -четворопол. Вредностите на параметрите Z_P и 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.

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 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 J_K , инјектирана на местото на грешка (слика 9.1.a – десно).

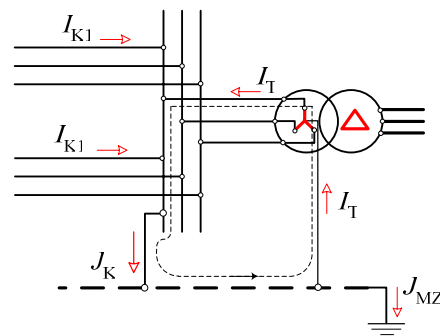
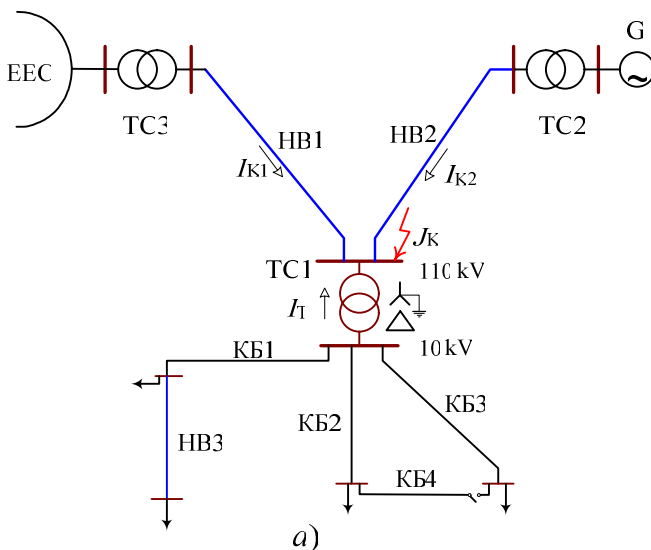
9.1.1. Формирање на колото на заземјувачкиот систем

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.

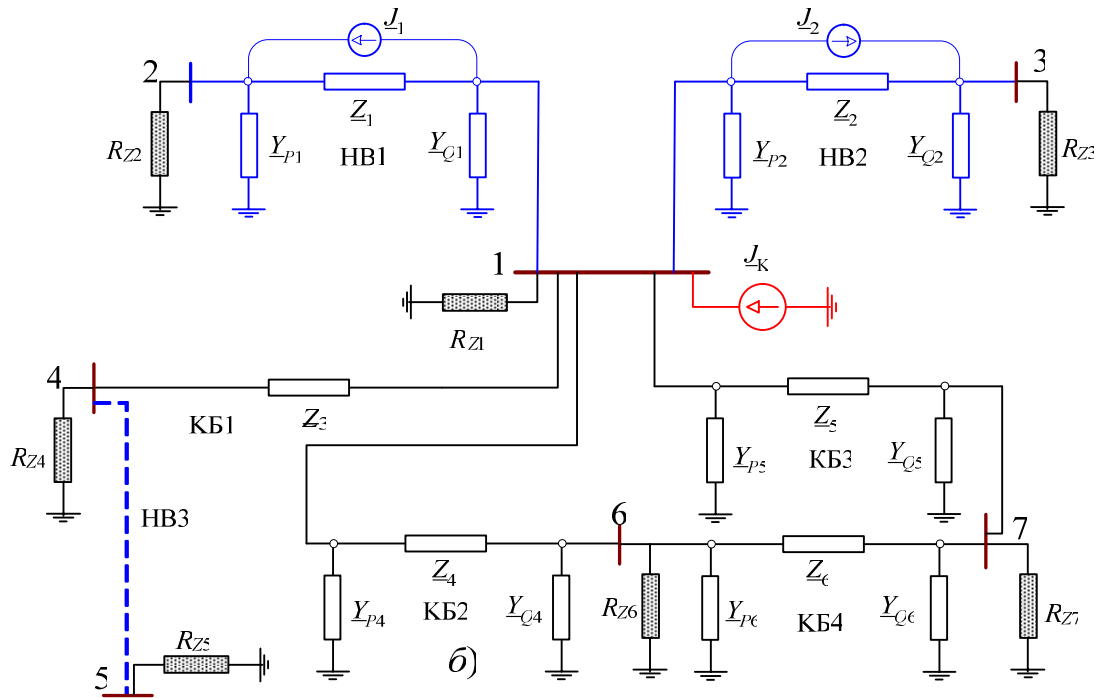
Кога секој елемент од мрежата се претстави со соодветната еквивалентна шема и кога сите елементи меѓусебно се поврзат на начин како што е тоа направено во реалната мрежа, се добива заменската шема, т.е. колото, на ЗС.

Досега реченото ќе го илустрираме на примерот прикажан на сликата 9.1. На сл. 9.1.а 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 J_k . На сликата 9.1.б, пак, е прикажано колото на соодветниот заземјувачки систем на набљудуваната мрежа.

Во колото на ЗС, прикажано на сликата 9.1.б се воведени следните обележувања. Со броевите 1, 2, . . . , 8 се нумерирани заземјувачките јазли од колото на ЗС, додека со $R_{Z1}, R_{Z2}, \dots, R_{Z8}$ се означени отпорностите на распространување 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 Y_{P1}, Z_1 и Y_{Q1} се означени соодветните елементи од π -заменската шема за водот НВ1. Слично, со Y_{P2}, Z_2 и Y_{Q2} се означени соодветните елементи од π -заменската шема за водот НВ2.



Легенда: J_k – вк. струја на земјоспој (1-фазна к. врска); I_{k1}, I_{k2} – струи на 1-фазна к. врска што доаѓаат кон местото на к. в. по надз. водови; I_T – струја низ ѕвездиштето од трансформаторот; I_{MZ} – струја што се одведува преку мрежест заз.



Слика 9.1. Електроенергетска мрежа со две напонски нивоа (а) и соодветно коло на заземјувачкиот систем (б)

Покрај тоа со J_1 и 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 прикажани 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.а, 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 J_j во тој јазел и напоните \underline{U}_k ($k = 1, n$) 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:

$$[\underline{Y}] \times [\underline{U}] = [\underline{J}] \quad (9.2)$$

На десната страна во системот (8.2) фигурира матрицата колона $[\underline{J}]$ на инјектираните струи во јазлите од колото на заземјувачкиот систем, $[\underline{U}]$ претставува матрицата 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 9.1б овие матрици ќе бидат:

$$[\underline{J}] = \begin{bmatrix} \underline{J}_K - \underline{J}_1 - \underline{J}_2 \\ \underline{J}_2 \\ \underline{J}_3 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}; \quad [\underline{U}] = \begin{bmatrix} \underline{U}_1 \\ \underline{U}_2 \\ \underline{U}_3 \\ \underline{U}_4 \\ \underline{U}_5 \\ \underline{U}_6 \\ \underline{U}_7 \end{bmatrix}; \quad [\underline{Y}] = \begin{bmatrix} \underline{Y}_{11} & -\underline{Z}_1^{-1} & -\underline{Z}_2^{-1} & -\underline{Z}_3^{-1} & 0 & -\underline{Z}_4^{-1} & -\underline{Z}_5^{-1} \\ -\underline{Z}_1^{-1} & \underline{Y}_{22} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\underline{Z}_2^{-1} & 0 & \underline{Y}_{33} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\underline{Z}_3^{-1} & 0 & 0 & \underline{Y}_{44} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \underline{Y}_{55} & 0 & 0 \\ -\underline{Z}_4^{-1} & 0 & 0 & 0 & 0 & \underline{Y}_{66} & -\underline{Z}_6^{-1} \\ -\underline{Z}_5^{-1} & 0 & 0 & 0 & 0 & -\underline{Z}_6^{-1} & \underline{Y}_{77} \end{bmatrix} \quad (9.3)$$

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 (9.3) дијагоналните елементи $\underline{Y}_{ii}; (i=1, n)$ изнесуваат:

$$\underline{Y}_{11} = R_{Z1}^{-1} + \underline{Y}_{Q1} + \underline{Y}_{P2} + \underline{Z}_1^{-1} + \underline{Z}_2^{-1} + \underline{Z}_3^{-1} + \underline{Y}_{P4} + \underline{Z}_4^{-1} + \underline{Y}_{P5} + \underline{Z}_5^{-1};$$

$$\underline{Y}_{22} = R_{Z2}^{-1} + \underline{Y}_{P1} + \underline{Z}_1^{-1};$$

$$\underline{Y}_{33} = R_{Z3}^{-1} + \underline{Y}_{Q2} + \underline{Z}_2^{-1};$$

$$\underline{Y}_{44} = R_{Z4}^{-1} + \underline{Z}_3^{-1};$$

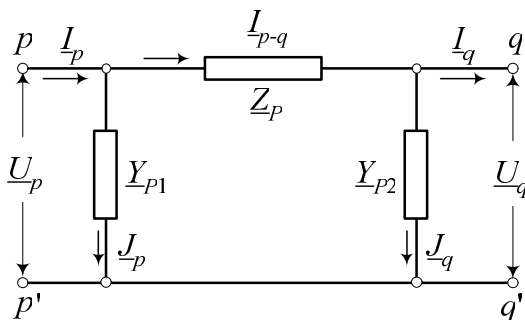
$$\underline{Y}_{55} = R_{Z5}^{-1};$$

$$\underline{Y}_{66} = R_{Z6}^{-1} + \underline{Z}_4^{-1} + \underline{Y}_{Q4} + \underline{Y}_{P6} + \underline{Z}_6^{-1};$$

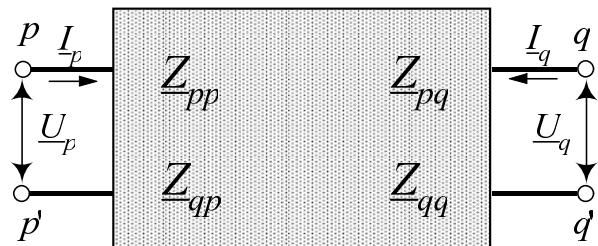
$$\underline{Y}_{77} = R_{Z7}^{-1} + \underline{Y}_{Q5} + \underline{Z}_5^{-1} + \underline{Y}_{Q6} + \underline{Z}_6^{-1}.$$

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 ЗС



Слика 9.2а



Слика 9.2б

Секој елемент од КЗС во принцип се претставува со еден четворопол (четворокрајник или мрежа со два пристапа). Од друга страна секој четворопол (слика 9.2), помеѓу паровите јазли p и q , во општ случај, може да се прикаже преку неговите Z -параметри и за него може да се пишува:

$$\underline{U}_p = \underline{Z}_{pp} \cdot \underline{I}_p + \underline{Z}_{pq} \cdot \underline{I}_q$$

$$\underline{U}_q = \underline{Z}_{qp} \cdot \underline{I}_p + \underline{Z}_{qq} \cdot \underline{I}_q$$

или

$$\underline{I}_p = \underline{Y}_{pp} \cdot \underline{U}_p + \underline{Y}_{pq} \cdot \underline{U}_q$$

$$\underline{I}_q = \underline{Y}_{qp} \cdot \underline{U}_p + \underline{Y}_{qq} \cdot \underline{U}_q$$

(9.4)

(9.5)

каде што е:

$$\begin{bmatrix} \underline{Y}_{pp} & \underline{Y}_{pq} \\ \underline{Y}_{qp} & \underline{Y}_{qq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{Z}_{pp} & \underline{Z}_{pq} \\ \underline{Z}_{qp} & \underline{Z}_{qq} \end{bmatrix}^{-1} = \frac{1}{\underline{Z}_{qq} \cdot \underline{Z}_{pp} - \underline{Z}_{pq}^2} \times \begin{bmatrix} \underline{Z}_{qq} & -\underline{Z}_{pq} \\ -\underline{Z}_{qp} & \underline{Z}_{pp} \end{bmatrix}$$

(9.6)

Откога со помош на релациите (9.5) ќе ги пресметаме струите \underline{I}_p и \underline{I}_q на четворополот, со примена на I Кирхофов закон се пресметуваат и струите \underline{J}_p , \underline{J}_q и \underline{I}_{p-q} :

$$\underline{I}_{p-q} = (\underline{U}_p - \underline{U}_q) / \underline{Z}_p$$

$$\underline{J}_p = \underline{I}_p - \underline{I}_{p-q}; \quad \underline{J}_q = \underline{I}_q + \underline{I}_{p-q}$$

(9.7)

Струите на одведување во земјата од одделните заземјувачи R_{Zi} ($i = 1, n$) на ЗС ќе бидат:

$$\underline{I}_{Zi} = \frac{\underline{U}_i}{R_{Zi}}; \quad i = 1, 2, \dots, n.$$

9.2.3. Програма за решавање на состојбата во колото на ЗС

За пресметување на состојбата во еден ЗС со произволна сложеност и димензии е изработена компјутерска програма RKZS.xls (решавање на колото на заземјувачкиот систем), пишувана во VBA и вградена во Excel.

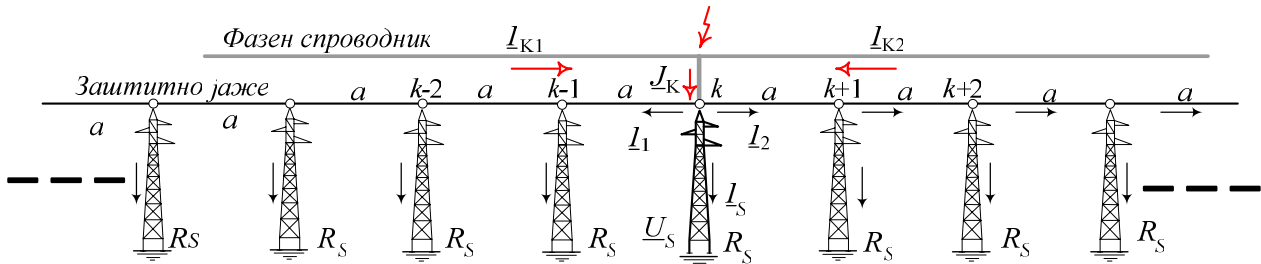
Пример 9.1. Се посматра режим на еднофазна куса врска настаната некаде на средината од еден 110 kV надземен вод, долг $l = 50$ km. Вкупната струја на куса врска изнесува $J_K = 4,2$ kA и (слика 1) притоа од левата страна на водот по фазниот спроводник кон местото на кусата врска доаѓа струја од $I_{k1} = 2,7$ kA додека од спротивната страна доаѓа струја $I_{k2} = 1,5$ kA ($I_{k1} + I_{k2} = J_K$). Сите струи се во фаза.

За водот се познати следните податоци: спроводници: Al/Č 240/40 mm²; заштитно јаже Fe III 50 mm²; столбови тип M4, според сликата 1 од примерот 7.1; специфична отпорност на плото 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 $\underline{z} = (r+jx) = (3,082+j1,289) = 3,322 \cdot e^{j21,90}$ Ω/km (видете го примерот 7.1); меѓусебна импеданција \underline{z}_m помеѓу фазниот спроводник и заштитното јаже $\underline{z}_m = (0,05+j0,355) = 0,358 \cdot e^{j82,0}$ Ω/km; редукционен фактор $r_f = 0,950 \cdot e^{-j5,60}$.

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: $\underline{z} = (r+jx) = (0,614+j0,767) = 0,983 \cdot e^{j51,3^\circ} \Omega/\text{km}$; $r_f = 0,711 \cdot e^{-j15,2^\circ}$.

Решение:



Слика 1. Распределба на струите на куса врска

На сл. 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} .

Разгледуваниот надземен вод, според зададените податоци ќе има вкупно $n = l/a = 160$ распони, додека половината вод ќе има $n' = 80$ распони. Во VII глава 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 \underline{Z}_{vl} , но на многу поедноставен начин:

$$\underline{Z}_r = \underline{z} \cdot a = (0,771 + j0,322) = 0,835 \cdot e^{j22,7^\circ} \frac{\Omega}{\text{распон}}; \quad \underline{Z}_{vl} \approx \sqrt{\underline{Z}_r \cdot R_S} - \frac{\underline{Z}_r}{2} = 2,51 \cdot e^{j9,74^\circ} \Omega.$$

Во последната формула со $\underline{Z}_r = \underline{z} \cdot a$ е означена импеданцијата на заштитното јаже во еден распон, додека со $R_S = 10 \Omega$ е означена просечната вредност на отпорноста на распоротирање на заземјувачите од столбот.

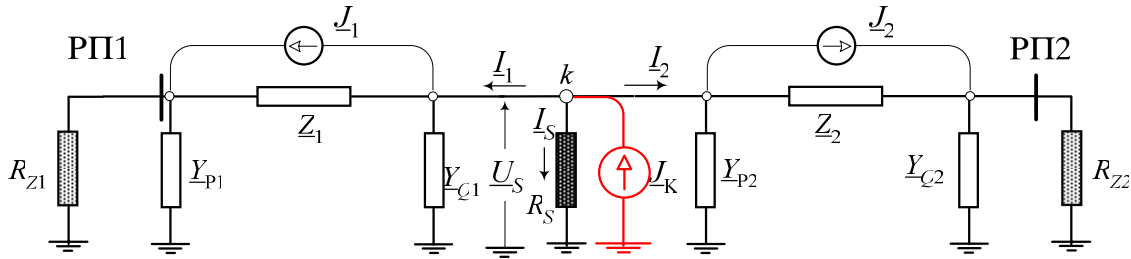
За да ги пресметаме струите \underline{I}_1 , \underline{I}_2 и \underline{I}_S во заземјувачкиот систем од надземниот вод ќе се послужиме со колото на ЗС прикажано на сликата 2. Во него секоја половина од водот е претставена со соодветниот π -четворпол со параметри \underline{Y}_P , \underline{Z} и \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:

$$\underline{Z}_P = 115,746,5 \cdot e^{j140,2^\circ} \Omega; \quad \underline{Y}_P = 0,399 \cdot e^{-j9,74^\circ} \text{ S}.$$

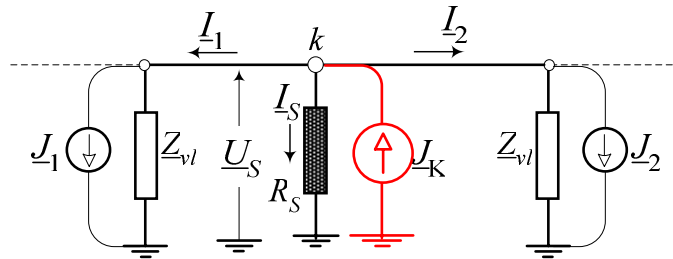
Како што и можеше да се очекува со оглед на должината на водот, параметрите \underline{Z}_P и \underline{Y}_P на π -заменската шема на водот ќе имаат вредности за кои што важи:

$$\underline{Z} \equiv \underline{Z}_P \rightarrow \infty; \quad \underline{Y}_P \rightarrow 1/\underline{Z}_{vl}.$$

Тоа дозволува наместо со колото од сликата 2, да работиме со колото на ЗС прикажано на сликата 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 2. Моделирање на ЗС на надземниот вод и негово упростување



Слика 3. Упростување на моделот од сликата 2

Во колата на заземјувачкиот систем од сликите 2 и 3 со \underline{J}_1 и \underline{J}_2 се означени еквивалентните струјни генератори со кои се опфаќа влиајнието на магнетската спрега помеѓу фазниот спроводник по којшто тече струјата на греката и заштитното јаже. За нив важи:

$$\underline{r}_f = 0,95 \cdot e^{-j5,6^\circ}; \quad \underline{c}_f = 1 - \underline{r}_f = (0,055 + j0,09215) = 0,107 \cdot e^{j59,3^\circ};$$

$$\underline{J}_1 = (1 - \underline{r}_f) \cdot \underline{I}_{K1} = 0,107 \cdot e^{j59,3^\circ} \cdot 2,7 = 0,289 \cdot e^{j59,3^\circ} \text{ kA и}$$

$$\underline{J}_2 = (1 - \underline{r}_f) \cdot \underline{I}_{K2} = 0,107 \cdot e^{j59,3^\circ} \cdot 1,5 = 0,161 \cdot e^{j59,3^\circ} \text{ kA.}$$

Притоа е усвоено дека комплексните преставници 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:

$$\underline{J}_Z = \underline{J}_K - \underline{J}_1 - \underline{J}_2 = \underline{r}_f \cdot \underline{J}_K = (3,97 - j0,387) = 3,989 \cdot e^{-j5,6^\circ} \text{ kA.}$$

Еквивалентната импеданција на ЗС на местото на грешката изнесува:

$$\underline{Z}_{ek} = \underline{Z}_{vl} \parallel \underline{Z}_{vl} \parallel R_S = (2,51/2) \cdot e^{j9,74^\circ} \parallel 10 = 1,116 \cdot e^{j8,65^\circ} \Omega$$

$$\underline{U}_S = \underline{Z}_{ek} \cdot \underline{J}_Z = 1,116 \cdot e^{j8,65^\circ} \cdot 3,989 \cdot e^{-j5,6^\circ} = 4,453 \cdot e^{j3,1^\circ} \text{ kV}$$

$$\underline{I}_S = \underline{U}_S / R_S = 0,4453 \cdot e^{j3,1^\circ} \text{ kA}$$

Од причини на симетрија ќе биде $\underline{I}_1 = \underline{I}_2$. Во тој случај, врз основа на II Кирхофов закон за струи за јазелот k , ќе имаме:

$$\underline{I}_1 = \underline{I}_2 = (\underline{J}_K - \underline{I}_S) / 2 = (1,878 - j2,299) = 1,878 \cdot e^{-j0,4^\circ} \text{ kA.}$$

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.

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:

$$r_f = 0,711 \cdot e^{-j15,2^\circ};$$

$$J_1 = 0,984 \cdot e^{j30,7^\circ} \text{ kA}; \quad J_2 = 0,547 \cdot e^{j30,7^\circ} \text{ kA}; \quad J_Z = 2,988 \cdot e^{-j15,2^\circ} \text{ kA};$$

$$Z_{vl} = 1,4604 \cdot e^{j23,72^\circ} \Omega; \quad Z_{ek} = Z_{vl} \prod Z_{vl} \prod R_S = 0,684 \cdot e^{j22,14^\circ} \Omega$$

$$U_S = Z_{ek} \cdot J_Z = 2,044 \cdot e^{j7,0^\circ} \text{ kV};$$

$$I_S = U_S / R_S = 0,2044 \cdot e^{j7,0^\circ} \text{ kA}; \quad (4,9\% \text{ од вкупната струја на грешка } J_K)$$

$$I_1 = I_2 = (J_K - I_S) / 2 = 1,999 \cdot e^{j-0,4^\circ} \text{ kA} \quad (47,5\% \text{ од вкупната струја на грешка } J_K).$$

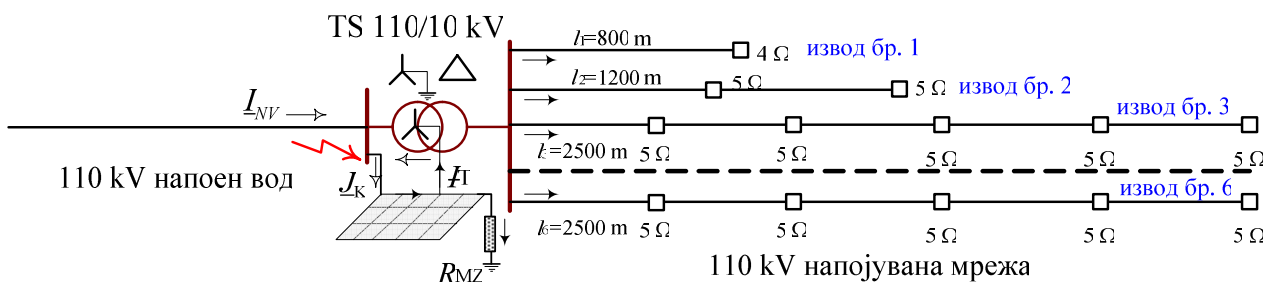
Заклучуваме дека во овој случај приликите на местото на земјоспојот се значително порелаксирани, т.е. напоните на допир и чекор околу столбот ќе бидат за повеќе од два пати помали.



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 ($Z_{vl} = 2,51 \cdot e^{j9,74^\circ}$; $r_f = 0,950 \cdot e^{-j5,6^\circ}$). Од оваа ТС се напојуваат 6 СН кабелски изводи (слика 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 Cu 70 mm², закопано во тло со специфична отпорност $\rho = 100 \Omega\text{m}$ на длабочина $h = 0,8$ m. Окцата на заземјувачот имаат димензии 10x10 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 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 редукионен фактор $r_{f.NV}$, како и влезните импеданции $Z_{vl.k}$ и факторите на изнесениот потенцијал до првите ТС СН/НН $k_{i.k}$ на поедините СН изводи k :

$$Z_{vl.NV} = 2,510 \cdot e^{j9,74^\circ} \Omega; \quad r_{f.NV} = 0,95 \cdot e^{-j5,6^\circ};$$

$$Z_{vl.1} = 0,727 \cdot e^{j34,4^\circ} \Omega; \quad k_{i.1} = 0,280 \cdot e^{-j79,7^\circ};$$

$$Z_{vl.2} = 0,145 \cdot e^{j11,8^\circ} \Omega; \quad k_{i.2} = 0,308 \cdot e^{-j57,3^\circ};$$

$$Z_{vl.3} = 0,901 \cdot e^{j28,9^\circ} \Omega; \quad k_{i.3} = 0,742 \cdot e^{-j14,5^\circ}.$$

Останатите изводи имаат исти карактеристики како и третиот извод, т.е.:

$$Z_{vl.4} = Z_{vl.5} = Z_{vl.6} = 0,901 \cdot e^{j28,9^\circ} \Omega; \quad k_{i.4} = k_{i.5} = k_{i.6} = 0,742 \cdot e^{-j14,5^\circ}.$$

Останати податоци:

Вкупна струја на еднофазна куса врска настаната во ТС ВН/СН: $J_K = 6 \text{ kA}$;

Фазна струја на грешка што тече по надземниот вод: $I_{NV} = 5,2 \text{ kA}$;

Фазна струја на грешка што тече кон местото на к.в. од енергетскиот тр.: $I_T = 0,8 \text{ kA}$;

Да се пресмета:

- напонот U_{MZ} на мрежестиот заземјува како и најголемите напони на допир и чекор во ТС 110/10 kV. Дали има опасност по луѓето.
- 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 заземјувачкиот систем Z_{ek} ќе ја добиеме како паралелна комбинација на сите импеданции на заземјување на надземните водови со 3. 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.:

$$Z_{ek} = R_{MZ} \prod Z_{vl.NV} \prod Z_{vl.1} \prod Z_{vl.2} \prod Z_{vl.3} \prod Z_{vl.4} \prod Z_{vl.5} \prod Z_{vl.6}, \text{ или}$$

$$Z_{ek} = \left(\frac{1}{R_{MZ}} + \frac{1}{Z_{vl.NV}} + \sum_{k=1}^6 \frac{1}{Z_{vl.k}} \right)^{-1} = (0,066253 + j0,021315) = 0,0696 \cdot e^{j17,8^\circ} \Omega$$

Напонот U_{MZ} на мрежестиот заземјувач за време на земјоспојот ќе биде:

$$U_{MZ} = Z_{ek} \cdot J_Z = 344 \cdot e^{-j1,2^\circ} \text{ V}$$

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:

$$U_k = k_{i,k} \cdot U_{MZ}; \quad k = 1, 2, \dots, 6.$$

На тој начин ја добиваме табелата 1 во која се прикажани пресметаните вредности на напоните U_k кај првите ТС СН/НН и струите на одведување I_k од поедините изводи ($k=1, 6$).

Табела 1. Резултати од пресметките на напоните и струите во СН мрежа

	Мрежест заземјувач	извод бр. 1	извод бр. 2	извод бр. 3	извод бр. 4	извод бр. 5	извод бр. 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/C 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:

$$\underline{Z}_{vl.NV2} = 1,4604 \cdot e^{j23,72^\circ} \Omega; \quad \underline{r}_{f.NV2} = 0,711 \cdot e^{-j15,2^\circ}.$$

Решение:

$$\underline{Z}_{ek} = 0,066447 \cdot e^{j18,1^\circ} \Omega; \quad \underline{J}_Z = 8,23 \cdot e^{-j9,6^\circ} \text{ kA}; \quad U_{MZ} = 547 \text{ V}.$$

■ ■ ■

10. ЛИТЕРАТУРА

- [1] Правилник 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", Naucna 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 međusobnih otpornosti tankih pravoliniskih provodnika", ELEKTROTEHNIKA, ELTHB2, 27 Zagreb , Maj - Juni 1984, pp.27-32.
- [9] Збирка техничких препорука ТП-1 до ТП-15 ЕПС, најновије 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. Od PWRD, Vol. 9 No. 2/1994.
- [15] Р. Миновски, Р. Ачковски. "Студија за можностите за подобрување на перформансите на заземјувачкиот 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, P 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 среднонапонските 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] Х. Пожар, "Расклопна постројења", Техничка књига, Загреб, 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.

- [16] Техничка препорака за проектирање, изградба и одржување на заземјувања на електроенергетски постројки (ТП-23), Здружена електропривреда Београд, јануари 1982.
- [17] 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.
- [19] 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.
- [20] 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.

- [1] IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding, ANSI/IEEE Std 80-1996, New York.
- [2] L. L. Grigsby, "The Electric Power Engineering Handbook", Auburn, Alabama, IEEE PRESS, 2001, part, SUBSTATION GROUNDING, Richard. P. Keil.
- [3] William, H. Kersting, "Distribution System Modeling and Analysis", 2002 by CRC Press LLC.
- [4] Charles F. Dalziel, "Dangerous Electric Currents" Transaction V. 65 August – September 1946 (579-584).
- [5] Charles F. Dalziel, "Electric shock hazard", IEEE – Spectrum, February 1972, (41 - 48).
- [6] 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).
- [7] W. R. Lee, "Threshold of ventricular fibrillation" RGE – 10/81, October 1981, (712-717).
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] B.Thapar, V.Gerez, "Equivalent Resistivity of Nonuniform Soil for grounding Grid Design", Apr 95 (94 SM 387-1), T-PWRD.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] 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
- [22] 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.
- [23] 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.
- [24] 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.
- [25] 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.
- [26] Chow, Y.L., and M.M.A.Salama, "A simplified method for calculating grounding grid resistance", T-PWRD Apr 94, pp. 736-742.
- [27] 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.
- [28] 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.

- [29] Y.L.Chow, M.M.Esherbiny, M.M.A.Salama, "Resistances Formulas of Grounding Systems in Two-Layer Earth", WM 96, T-PWRD
- [30] 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
- [31] 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.
- [32] 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.
- [33] 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.
- [34] Збирка техничких препорука ТП-1 до ТП-15 ЕПС, најновије издање, март 2001.
- [35] Техничка препорука ТП-23, УДРУЖЕНА ЕЛЕКТРОПРИВРЕДА-БЕОГРАД, 1982 г.
- [36] 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).
- [37] Техничка препорука 9, Електропривреде Србије, за извођење уземљења и уземљивача стубова надземних електроенергетских водова номиналног напона 1, 10, 20, 35 и 110 kV.
- [38] Збирка електротехничких прописа - V измењено и допуњено издање, Службени лист на СФРЈ 1979г.
- [39] 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.
- [40] J. Nahman, "Uzemljenje neutralne ta~ke distributivnih mreza", Naucna knjiga, Beograd 1980.
- [41] J. Nahman, "Programi EFD-1 i EFD-2 za prora~un uzemljiva~kih sistema u dvoslojnom i homogenom tlu", XIII Savjetovanje, JUNAKO CIGRE, Bled 1977.
- [42] J. Nahman, "Numeri~ki postupak za prora~un medjusobnih otpornosti tankih pravoliniskih provodnika", ELEKTROTEHNIKA, ELTHB2, 27 Zagreb, Maj - Juni 1984, pp.27-32.
- [43] J.M.Nahman, 'Earthing effects of coated underground cables with metallic shields bonded to earth electrodes', IEE, January 1997.
- [44] J. Nahman, V. Djordjevic, "Earth fault currents and potential distribution in composite systems", IEE Proc.-Gener. Transm. Distrib., Vol. 142, No. 2, March 1995, pp. 135-142.
- [45] 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.
- [46] J. Нахман, Д. Јеловац, "Анализа међусобног утицаја уземљивача", XIII Савјетовање, Блед, 17-22 април, 1977, стр. 93-109.
- [47] J. Нахман, В. Ђорђевић, "Расподела струја земјоспоја и потенцијала у сложеним уземљивачким системима", ЈУКО ЦИГРЕ, 22 Саветовање, Врњачка Бања, 21-25 мај 1995, Р 23-12.
- [48] 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.
- [49] 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.
- [50] 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.
- [51] 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.
- [52] 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.
- [53] 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.
- [54] 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.
- [55] 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.

- [56] J.M.Nahman,V.B.Djordjevic, "Resistance to ground of combined grid-multiple rods electrodes", January 96 (WM 005-9), T-PWRD.
- [57] 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.
- [58] J. Нахман, В. Мијаиловић, "Високонапонска постројења", ЕТФ Београд, 2000. - книга.
- [59] J. Нахман, "Одбрана поглавја из разводних постројења", "Академска мисао", Београд, 2002 г. Книга.
- [60] Lj. Popovic, " Practical method for evaluating ground fault current distribution in station, towers and ground wire", IEEE/PES Winter Meeting, January 21-25, 1996.
- [61] D. Jelovac, "Matemati~ki modeli za analizu uslova uzemljenja TS 10/0.4 kV", ELEKTROTEHNIKA, ELTHB2, 29, Zagreb, Maj - Juni 1986, pp.149-154.
- [62] Medi }, "Uz prora~un medjusobnog djelovanja uzemljiva~a", ELEKTROTEHNIKA, ELTHB 2, 29, Zagreb, Maj - Juni 1986, pp.93-98.
- [63] Zeli }, I. Medi }, "Analiza utjecaja uzemljiva~a ograde postrojenja na raspodjelu potencijala u okolnom tlu", ELEKTROTEHNIKA, ELTHB2,29, Zagreb, Maj - Juni 1986, pp.79-83.
- [64] Galek, "Analiza dodirnog napona i na~ina uzemljenja ograde elektroenergetskog postrojenja", ELEKTROTEHNIKA, ELTHB2,27, Zagreb, 1984, pp.105-108.
- [65] S. Milun, "Geoelektri~no sondiranje izmjeni~nom strujom: utjecajne velicine", ELEKTROTEHNIKA, ELTHB2,27, Zagreb, 1984, pp.127-132.
- [66] S. Milun, "Obrada rezultata geoelektri~nog sondiranja nehomogenog tla", ELEKTROTEHNIKA, ELTHB2,27, Zagreb, 1984, pp.133-138.
- [67] Pavi }, "Mjerenje otpora uzemljenja mosnom metodom", ELEKTROTEHNIKA, ELTHB2, 27, Zagreb, 1984, pp.139-143.
- [68] Љ. Герић, "Карактеристике прстенстих уземљивача", XIII Савјетовање, Блед, април 1977, ст. 93-110.
- [69] В. Стевановић, "Редукциони фактор 10 kV кабла PP 41-прорачун и лабораторијска мерења", ЈУКО ЦИГРЕ, 23 Савјетовање, Херцег Нови, 25-30 мај 1997, Р 21-09.
- [70] 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.
- [71] 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.
- [72] Љ. Поповић, " Практична метода за анализу сложених уземљивачких система на примеру ТС 110/10 kV "ОБИЛИЋ", ЈУКО ЦИГРЕ, 24 Саветовање, Врњачка Бања, 17-20 октомври 1999, Р 23-07.
- [73] 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.
- [74] 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.
- [75] 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.
- [76] Љ. Поповић, "Практична метода за одредивање расподеле струје земљоспоја на надземном воду", ЈУКО ЦИГРЕ, 23 Савјетовање, Херцег Нови, 25-30 мај 97, Р 23-06.
- [77] В. Балковој, "О ефектима полагања линиичних уземљивача у истом рову са 20 kV полиетиленским кабловима", ЕЛЕКТРОПРИВРЕДА бр.4, 1998, стр. 12-22.
- [78] 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.
- [79] Kostic,M.B, "Parametric analysis of foundation grounding systems surrounded by two-layer soil", T-PWRD Jul 94, pp. 1406-1411.
- [80] 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.
- [81] Leonid. D. Grecev, "Computer Analysis of Transient Voltages in Large Grounding Systems", Apr 96 (95 SM 363-2), T-PWRD.
- [82] 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.
- [83] Златаноски, М., "Ризик од несреќи во разводните постројки за висок напон", докторска дисертација, Скопје,

1991 год.

- [84] Zlatanovski, M., "Ocena verovatnoce izlozenosti na opasnost u okolini visokonaponskih postrojenja", JUKO CIGRE, XX Savjetovanje, Neum, 22-26 April, 1991.
- [85] 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".
- [86] V. Handziski, P. Vrangalov, V. Handziski, V. Dimcev, "An Improved Study of the Schlumberger Method for Soil Resistivity Measurements", (Athens) MED02/262, November 2002.
- [87] Ackovski, R., Rajicic, D., "New Method for Tower Potentials and Ground Wire Current Computation", Int.Conf. "Modeling and Simulation", Scottsdale, Arizona, March 1988.
- [88] Р. Ачковски, "Проектирање на заземјувачи со помош на персонални компјутери", Семинар за електроинженери, Охрид 1991.
- [89] Р. Ачковски, "Надземни водови - елементи на заземјувачкиот систем на ЕЕС", Семинар за електроинженери, Охрид 1997.
- [90] D. Rajicic, R. Ackovski, R. Taleski, " Voltage Correction Power Flow, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 9, No. 2, pp. 1056-1062, April, 1994
- [91] R. Taleski, D. Rajicic, "Noniterative Power Flow Method for Radial and Weakly Meshed Distribution Networks, september 1995, Ohrid, Republic of Macedonia.
- [92] 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).
- [93] 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.
- [94] Н. Ацевски, "Анализа на приликите во заземјувачкиот систем на СН електроенергетски мрежи при појава на куси врски со земја", Магистерски труд, Скопје, февруари 1996.
- [95] Н. Ацевски, Р. Ачковски, " Пресметка на приликите во заземјувачките системи на среднонапнските дистрибутивни мрежи при појава на земен спој односно куса врска", I Советување на МАКО СИГРЕ, , Струга, септември, 1996 г, стр. 44-52.
- [96] Н. Ацевски, Ј. Шикоски, " Решавање на галвански одвоени заземјувачи и заземјувачки системи", I Советување на ЕСМ, Битола, 16-18 декември 1999г., стр. 166-169.
- [97] 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.
- [98] 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.
- [99] 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.
- [100] 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.
- [101] N. Acevski, R. Ackovski, "Determining of galvanically separated gronding grids and grounding systems", MELECON'2000, 10th Mediterranean Electrotehcnical Conference May 29-31 CYPRUS, IEEE Region 8. No, MEL0316.
- [102] 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.
- [103] 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.
- [104] 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.
- [105] R. Ackovski, N. Acevski, "Method for Analysis of Complex Grounding Cables Systems", JBSAEM 2-K, 15-17 September 2000, Ohrid.
- [106] Р. Ачковски, Н. Ацевски, "Кабли со изолација PE и XLPE, посматрани како елементи на заземјувачките системи", XXXVI Меѓународна конференција ЕИСТ 7, 8 јуни 2001, Битола, стр.7-12.
- [107] Р. Ачковски, Н. Ацевски, "За редуциониот фактор на класичните кабли", XXXVI Меѓународна конференција ЕИСТ 7, 8 јуни 2001, Битола, стр. 13-18.

- [108] 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.
- [109] 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.
- [110] Р. Ачковски, Н. Ацевски, "Хибриден метод за анализа на приликите во сложени заземјувачки кабелски системи", Трето советување, МАКО-ЦИГРЕ, Охрид, 2001, R 31-01.
- [111] 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.
- [112] 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.
- [113] Н. Ацевски, Р. Ачковски, "Анализа на влијанието на металните инсталации во земјата врз точноста на мерењето на отпорноста на плото", Трето советување, МАКО-ЦИГРЕ, Охрид, 2001, R 23-08.
- [114] 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.
- [115] Н. Ацевски, Р. Ачковски, "Анализа на начинот на заземјување на оградата на ТС", Трето советување, МАКО-ЦИГРЕ, Охрид, 2001, R 23-06.
- [116] 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.
- [117] М. Златаноски, Р. Ачковски, Н. Ацевски, "Прилог кон испитувањето на критериумите за безбедност кај ТС СН/НН"- Трето советување, МАКО-ЦИГРЕ, Охрид, 2001, R 23-04.
- [118] 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.
- [119] Н. Ацевски, Р. Ачковски, "Итеративен метод за анализа на сложени заземјувачки кабелски системи" -Битола, Зборник на трудови, 2002.
- [120] Програмски пакет "ЗАЗЕМ" за проектирање на сложени заземјувачи со произволна структура и геометрија. ЕТФ-Скопје, 1991 год.
- [121] 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.
- [122] Главен проект на заземјувањето и громобраните на ТС Скопје 1- електричен дел. ХЕП - Скопје, 1964.
- [123] 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.
- [124] 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.
- [125] Р. Ачковски, Н. Ацевски, "Нови модел класичног IPO кабла – посматран као елементат уземљивачких система", 17 Меѓународни Симпозиум о кабловима, ICS' 2002, Златибор, 22-26 Септембар 2002 г, R III-14, стр. 163-170.
- [126] 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 .
- [127] 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.
- [128] 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.
- [129] Р. Ачковски, Р. Талески, А. Димитровски, Д. Рајчиќ. 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.
- [130] Magazine ELECTRA 30 years 1968-1998, complet CDs.
- [131] Р. Ачковски, Н. Ацевски, К. Наумоски, "Распределба на струите на доземен спој во заземјувачкиот систем на надземните водови", труд во ракопис.
- [132] Р. Ачковски, Н. Ацевски, К. Наумоски, "Оценка на перформансите на заземјувачкиот систем на водот 400 kV Дуброво - Штип", труд во ракопис.

- [133] Д. Рајчиќ, Р. Ачковски, "Модел на кабелски електроенергетски вод како компонента на заземјувачкиот систем", труд во ракопис.
- [134] 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.
- [135] D. Raji~ic, R. Talevski, "Two novel methods for radial and weakly meshed network analysis", Electric Power Systems Research 48 (1998) pp. 79-87.
- [136] 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.

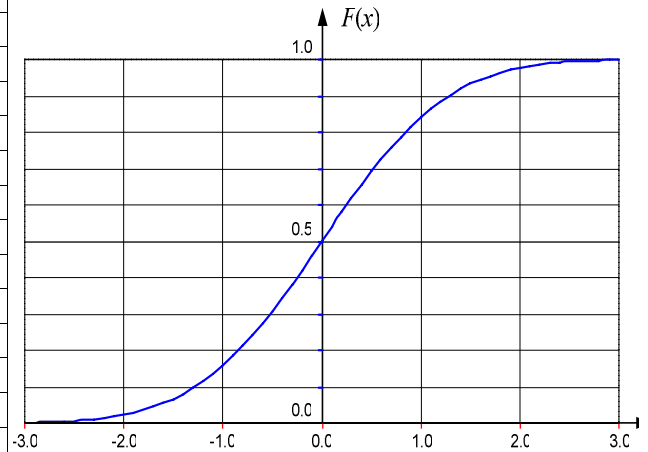
П Р И Л О З И

ПРИЛОГ П1. Табелите со вредностите на функција на распределба на нормираната Гаусовата (нормална) распределба $N(0, 1)$ и нејзина инверзна функција

Табела П.1.1. Гаусова функција на распределба $F(x) = P$

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

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



Напомена. За вредности на x што не се содржат во табелата да се применува постапката на линеарна интерполација. За поголема точност на проценката да се користи следната приближна релација:

$$F(x_0 + \Delta x) \approx F(x_0) + \frac{e^{-x_0^2/2}}{\sqrt{2\pi}} \cdot \Delta x \cdot (1 - x_0) \cdot \frac{\Delta x}{2}$$

Табела П.1.2. Инверзна гаусова функција на распределба $x = F^{-1}(P)$; $F^{-1}(1-P) = -x$

P	x	P	x	P	x	P	x	P	x	P	x	P	x
0,50	0,00000	0,60	0,25335	0,70	0,52440	0,80	0,84162	0,90	1,28155	0,990	2,32635	0,9990	3,090232
0,51	0,02507	0,61	0,27932	0,71	0,55338	0,81	0,87790	0,91	1,34076	0,991	2,36562	0,9991	3,121389
0,52	0,05015	0,62	0,30548	0,72	0,58284	0,82	0,91537	0,92	1,40507	0,992	2,40892	0,9992	3,155907
0,53	0,07527	0,63	0,33185	0,73	0,61281	0,83	0,95417	0,93	1,47579	0,993	2,45726	0,9993	3,194651
0,54	0,10043	0,64	0,35846	0,74	0,64335	0,84	0,99446	0,94	1,55477	0,994	2,51214	0,9994	3,23888
0,55	0,12566	0,65	0,38532	0,75	0,67449	0,85	1,03643	0,95	1,64485	0,995	2,57583	0,9995	3,290527
0,56	0,15097	0,66	0,41246	0,76	0,70630	0,86	1,08032	0,96	1,75069	0,996	2,65207	0,9996	3,352795
0,57	0,17637	0,67	0,43991	0,77	0,73885	0,87	1,12639	0,97	1,88079	0,997	2,74778	0,9997	3,431614
0,58	0,20189	0,68	0,46770	0,78	0,77219	0,88	1,17499	0,98	2,05375	0,998	2,87816	0,9998	3,540084
0,59	0,22754	0,69	0,49585	0,79	0,80642	0,89	1,22653	0,99	2,32635	0,999	3,09023	0,9999	3,719016

ПРИЛОГ П2. Содржина и наставна програма по предметот:
"ЗАЗЕМЈУВАЧИ И ЗАЗЕМЈУВАЧКИ СИСТЕМИ ВО ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТСКИТЕ МРЕЖИ"

1.	Наставен предмет	ЗАЗЕМЈУВАЧИ И ЗАЗЕМЈУВАЧКИ СИСТЕМИ ВО ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТСКИТЕ МРЕЖИ	
2.	Шифра	Дополнително ќе биде внесена	
3.	Студиска програма	Електроенергетски Системи(ЕЕС)	
4.	Семестар (изборност)	Семестар: петти, зимски; предмет: изборен	
5.	Цели на предметот	Запознавање со улогата и задачата на заземјувачите во електроенергетските мрежи и системи. Пресметка на нивните карактеристики, избор, димензионирање, проектирање. Сигурност. Ризик. Заземјувачки системи во електроенергетските мрежи. Компјутерски подржано проектирање.	
6.	Оспособен за (компетенции)	Пресметка, димензионирање, проектирање и изведба на заземјувачи и заземјувачки системи.	
7.	Услов за запишување на предметот	нема	
8.	Основна литература (до 3 наслови)	1. Р. Ачковски, "Заземјувачи и заземјувачки системи", ЕТФ-Скопје, 2005 (изготвен ракопис). 2. Ј. Нахман, "Уземљење неутралне тачке дистрибутивних мрежа", Научна књига, Београд 1980 (книга). 3 Р. Anderson, "Analysis of Faulted Power Systems", IOWA State University Press/AMES, 1973.	
9.	Број на кредити	6	
10.	Вкупен расположив фонд на време	6 ECTS x30 часа = 180 часа	
11.	Распределба на расположивото време		
11.1	П -	Предавања-теоретска настава	45 часа
11.2	ЛВ -	Лабораториски вежби	15 часа
11.3	АВ -	Аудиторни вежби, консултации	15 часа
11.4	СУ -	Самостојно учење	60 часа
11.5	ПЗ -	Проверка на знаење	5 часа
11.6	СЗ -	Семинарски работи, самостојни задачи	40 часа
12.	Оценување		
12.1	Посетеност на настава до 10 бода		10 бода
12.2	Парцијални испити		200 бода
12.3	Тестови		0 бода
12.4	Семинарски работи и самостојни задачи		40 бода
12.5	Лабораториски вежби		0 бода
Забелешка:		Бодови:	Оценки:
		од 150 до 170	6 (шест)
		од 171 до 190	7 (седум)
		од 191 до 210	8 (осум)
		од 211 до 230	9 (девет)
		од 231 до 250	10 (десет)
13.	Услов за потпис и формален испит	редовно посетување на наставата	

ПЛАНИРАЊЕ АКТИВНОСТИ ЗА НАСТАВНИОТ ПРЕДМЕТ ЗАЗЕМЈУВАЧИ И ЗАЗЕМЈУВАЧКИ СИСТЕМИ ВО ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТСКИТЕ МРЕЖИ

недела	Предавања - теоретска настава	
	часа	тема
1	3	Вовед. Област на изучување. Основни поими. Основна задача на заземјувачите. Видови заземјувачи. Карактеристични величини на заземјувачите во електроенергетските мрежи (ЕЕМ) и електроенергетските системи (ЕЕС). Електричен удар и ефекти од струјата на ударот. Критериуми за опасност, ризик. Прописи.
2	3	Моделирање на концентрираните заземјувачи и нивно решавање со помош на компјутер. Сопствени и меѓусебни отпорности. Случај на линеични заземјувачи. Метод на средни потенцијали, Нојманов интеграл. Максвелови равенки.
3	3	Заземјувачи поставени во неограничено тло. Ограничено тло. Случај кога земјата е двослој. Заемно влијание на блиски, но галвански одвоени заземјувачи. Случаи што се среќаваат во практиката. Извоз на опасни потенцијали. Специфични комбинации.
4	3	Димензионирање на заземјувачките системи (ЗС). Типски форми. Пресметка на карактеристичните величини - упростени постапки и практични релации. Ризик.
5	3	Програмски пакет ЗАЗЕМ и негова примена за решавање на концентрирани заземјувачи. Карактеристики на пакетот. Влезни датотеки, излезни резултати.
6	3	Заземјувачи на столбовите, изведба. Видови заземјувачи, типски решенија и нивни карактеристики. Ударна импеданција. Надземни водови како елементи на заземјувачкиот систем во електроенергетските мрежи. Приближно и егзактно моделирање
7	3	Распределба на струите на куса врска во ЗС на надземен вод. Редукционен фактор. Опасни магнетски влијанија на енергетските водови. Индуцирани ЕМС. Нивна пресметка и нивна редукција. Прписи, дозволени вредности.
8	3	Колоквиумска недела
9	3	Енергетски кабли како елементи на ЗС. Кабли со неизолиран и изолиран метален плашт. Подолжни параметри. Модел со распределени и со концентрирани параметри. Моделирање со активни четворокрајници. Егзактен и приближен модел.
10	3	Заемно електромагнетско влијание на каблите. Редукционен фактор на кабел – дефиниција и начин на пресметување кај каблите со разни конструктивни особености. Извезување на потенцијалот. Нелинеарности во моделот кај каблите со челична арматура. Специјални случаи.
11	3	Заземјувачи на ТС СН/НН. Заштитни и работни заземјувачи, типски форми и нивни карактеристики. Заземјувачи на ТС ВН/СН. Технички прописи. Технички препораки и усвоена практика. Избор на форма и димензии на заземјувачите: приближни полуемпириски релации. Избор и димензионирање со помош на пакетот "ЗАЗЕМ".
12	3	Заземјувачки системи во ВН преносни мрежи. Моделирање. Методологија за пресметка. Примена на теоријата на генерализирани повеќекрајници. Пресметка на потенцијалите и распределбата на струјата во ЗС за разни локации на грешката.
13	3	Заземјувачки системи на СН дистрибутивни мрежи. Моделирање. Решавање на ЗС во услови на постоење на земјоспој. Осврт кон некои од постојните матрични методи: метод на јазловите потенцијали, метод на сумирање адмитанции; хибриден итеративен метод.
14	3	Анализа на состојбата во мрежата: мрежи со изолирана/компензирана неутрална точка и со неутрална точка (НТ) заземјена преку мала импеданција. Избор на начинот на заземјувањето на неутралната точка; практика, препораки и регулатива.
15	3	Приказ на постојната состојба со третманот на НТ во нашата земја и во странство. Тенденции. Анализа на некои карактеристични случаи во нашите СН мрежи.
Збир	45	

Прилог 3. ЗАДАЧИ ОД РАЗНИ ОБЛАСТИ

1. Заземјување на столбовите од надземните водови

Задача 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:

$$R_Z = \frac{\rho}{2\pi \cdot l} \cdot \ln \frac{2l}{d} = \frac{100}{2\pi \cdot 10} \cdot \ln \frac{2 \cdot 10}{0,009} = 12,265 \Omega. \quad (1)$$

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:

$$\varphi_M = \alpha_M \cdot I_Z = \frac{\rho \cdot I_Z}{4\pi l} \cdot \ln \frac{R_1 + R_2 + l}{R_1 + R_2 - l} \quad (2)$$

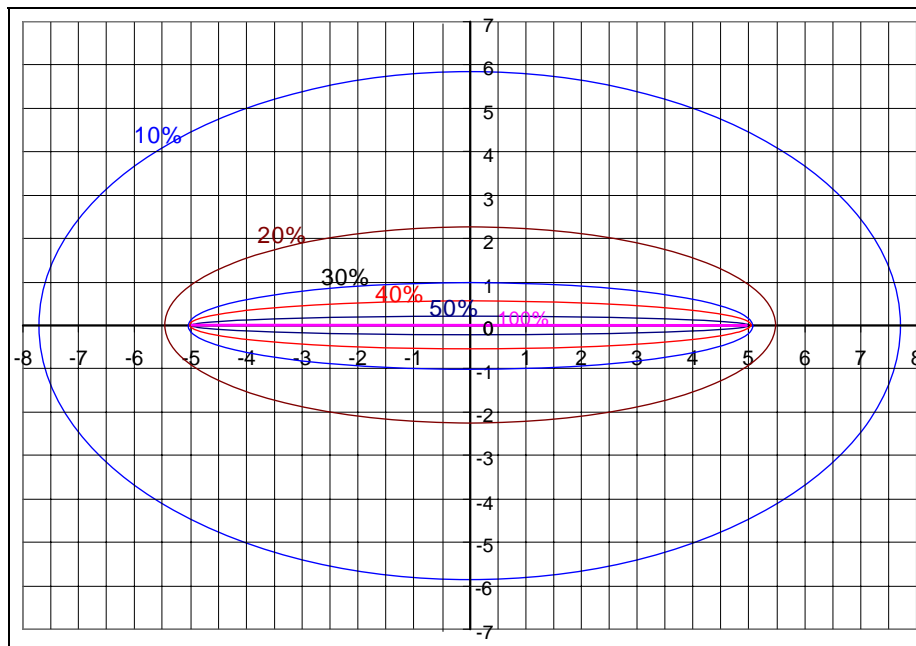
каде што R_1 и R_2 претставуваат растојанија од посматраната точка М до обата краја на електродата.

Од последната релација произлегува заклучокот дека еквипотенцијалните линии на полето околу заземјувачот ќе претставуваат геометриско место на точки за кои важи релацијата:

$$\varphi = \frac{\rho \cdot I_Z}{4\pi l} \cdot \ln \frac{R_1 + R_2 + l}{R_1 + R_2 - l} = \text{const}. \quad (3)$$

од каде што следува:

$$R_1 + R_2 = \frac{K+1}{K-1} \cdot l = \text{const}; \quad K = \exp\left(\frac{4\pi l \cdot \varphi}{\rho \cdot I_Z}\right). \quad (4)$$

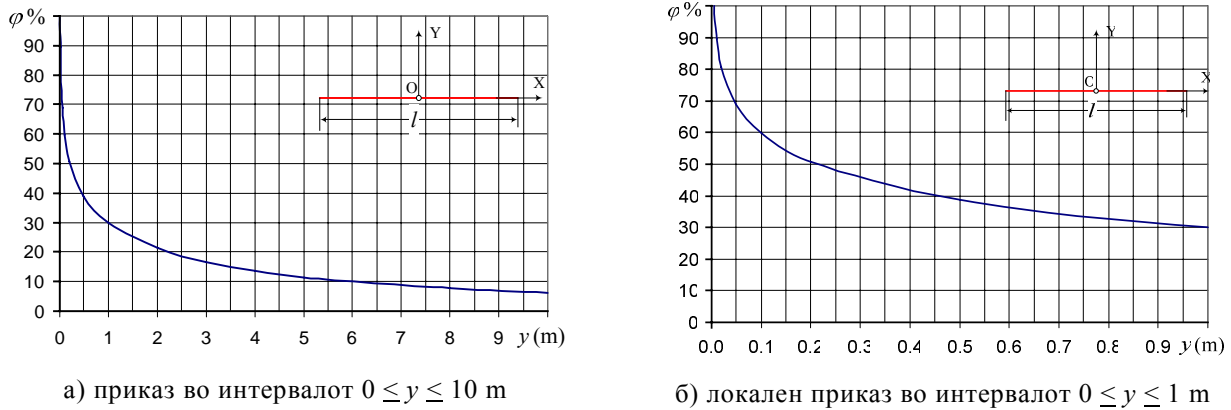


Слика 1. Еквипотенцијални линии околу хоризонтален заземјувач

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.

На тој начин се добива фамилијата еквипотенцијални линии – елипси, за разни вредности на потенцијалот φ . Некои од нив, за $\varphi = 10\%, 20\%, 30\%, 40\%$ и 50% . Тие се прикажани на сликата 1.

Од сликата 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 (1.4) покажуваат дека таа зависност има облик како на сликата 2.



Слика 2. Зависност $\varphi\%(y)$ по должината на Y – оската

Од сликата 2.б 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 околн простор. Значи со таквото зголемување на пречникот сме совладале 40% од отпорот со кој тлото 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 низка вредност на ρ и да биде добро набиена. Следните десетина cm во околината на заземјувачите не се толку влијателни бидејќи според сликата 2.б на тој дел од земјиштето отпаѓа само 10 -тина % од отпорноста на тлото. 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. Натомошното 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 2.б 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 оваа задача 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



Задача 2. Заземјувачот разгледуван во претходната задача ($l = 10$ m, $d = 9$ mm, $I_Z = 10$ A) е поставен во земјиште со висока специфична отпорност $\rho = 500$ Ωm . 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 $\rho_1 = 30$ Ωm , 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 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 $\rho = 5$ Ωm .

Решение:

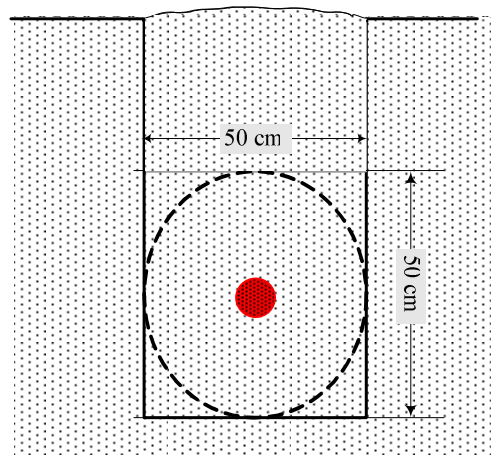
Отпорноста на распростирање на заземјувачот во овој случај (неограничена хомогена средина со специфична отпорност $\rho = 500$ Ωm), според релацијата (3.26), ќе биде:

$$R_Z = \frac{\rho}{2\pi \cdot l} \cdot \ln \frac{2l}{d} = \frac{500}{2\pi \cdot 10} \cdot \ln \frac{2 \cdot 10}{0,009} = 61,325 \Omega.$$

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 распростирање на заземјувачот R_Z ја поделиме во два дела – дел R_1 на кој отпаѓа отпорноста со која слојот земја околу заземјувачот со дебелина $\delta = 25$ cm се спротивставува на течењето на струјата и на делот R_2 којшто отпаѓа на преостанатиот дел простор околу заземјувачот.



Слика 1

Тогаш врз основа на сликата 2.б 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 2.б, отпаѓаат приближно 52% од вкупната отпорност R_Z , т.е. $R_1 = 0,52 \cdot 61,325 = 31,89$ Ω , додека остатокот ќе биде $R_2 = 0,48 \cdot R_Z = 29,44$ Ω .

Ако околу заземјувачот поставиме слој добро спроводна земја со специфична отпорност $\rho_1 = 30 \Omega\text{m}$ според сликата 2.1, тогаш апроксимирајќи го квадратниот облик на слојот земја со кружен облик со пречник $D = 2\delta = 50 \text{ cm}$ 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:

$$R'_1 = \frac{\rho_1}{\rho} \cdot R_1 = \frac{30}{500} \cdot 31,89 = 1,91 \Omega.$$

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:

$$R'_1 = \frac{\rho_2}{\rho} \cdot R_1 = \frac{5}{500} \cdot 31,89 = 0,319 \Omega,$$

додека вкупната отпорност R'_Z ќе изнесува:

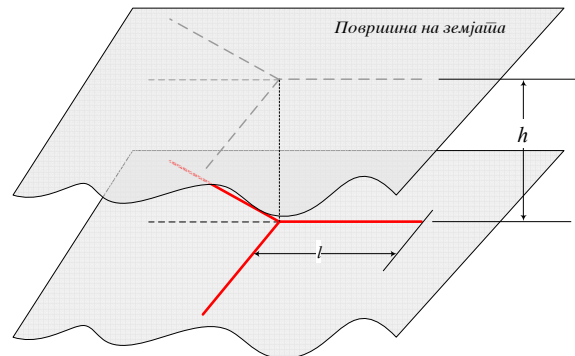
$$R'_Z = R'_1 + R_2 = 0,319 + 29,44 = 29,759 \Omega \approx 0,49 \cdot R_Z$$

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 случајов 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.



Задача 3. Да се пресмета отпорноста на распростирање R_Z на зракаст заземјувач во форма на правилна трикака звезда според слика 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 25x4 mm ($d = 22 \text{ mm}$) со должина $l = 10 \text{ m}$. Колкав ќе биде коефициентот на искористување на заземјувачот $\eta = ?$ При решавањето на задачата да се користи програмата "ZAZEM.xls".



Слика 1

Решение:

Кога еден заземјувач е составен од n еднакви елементи тогаш во идеален случај, кога тие не би имале меѓусебе никакво влијание, вкупната отпорност на распространување на заземјувачот R_Z би била:

$$R_Z = R_1 / n, \quad (1)$$

каде што со R_1 е означена отпорноста на распространување 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 распространување на заземјувачот R_Z ќе биде поголема од претходната вредност, добиена со изразот (1). Значи постои, како што се вели заедно "екранирање" на елементите од заземјувачот поради што елементите од заземјувачот не се целосно "искористени". Степенот на тоа заедно екранирање се искажува преку т.н. "коэффициент на корисно дејство" η .

Вистинската вредност на отпорноста R_Z на заземјувачот притоа можеме да ја пресметаме со помош на релацијата (2):

$$R_Z = \frac{R_1 / n}{\eta} = \frac{R_1}{\eta \cdot n}. \quad (2)$$

од каде што следи:

$$\eta = \frac{R_1}{R_Z \cdot n}. \quad (3)$$

Со помош на програмата ZAZEM.xls, многу едноставно може да се определи отпорноста на распространување R_Z . Втор начин на кој може да се пресмета отпорноста на распространување на заземјувачот е со помош на следната полуемпирирска формула (видете ја задачата бр. 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 ZAZEM.xls и за отпорноста на распространување на трикраката ѕвезда се добива:

$$R_Z = 6,075 \Omega.$$

Сега со помош на (3) можеме да го пресметаме коэффициентот на искористување η : Најнапред ќе ја пресметаме отпорноста на распространување 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 :

$$R_1 = \frac{\rho}{\pi \cdot l} \cdot \ln \frac{l}{\sqrt{h \cdot d}} = \frac{100}{\pi \cdot 10} \cdot \ln \frac{10}{\sqrt{0,75 \cdot 0,022}} = 13,862 \Omega;$$

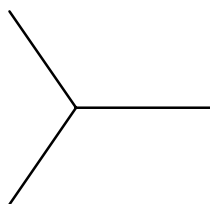
$$\eta = \frac{R_1}{n \cdot R_Z} = \frac{13,862}{3 \cdot 6,075} = 0,761.$$



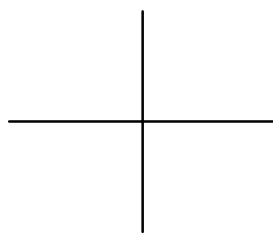
Задача 4. Да се определи зависноста $\eta = f(l)$ на зракастиот заземјувач во форма на правилна:

- а) трикрака ѕвезда (сл.1.а);
- б) четирикрака ѕвезда (сл.1.б) и
- в) шестокрака ѕвезда (сл. 1.в).

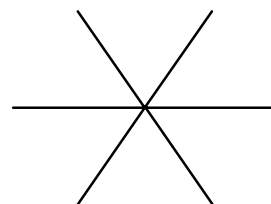
Останатите податоци за заземјувачите се исти како и во претходната задача: $\rho = 100 \Omega\text{m}$; $h = 0,75 \text{ m}$; $d = 22 \text{ mm}$. Пресметките да се прават за должини на краците во интервалот $l \in (1 \div 20) \text{ m}$.



Слика 1.а

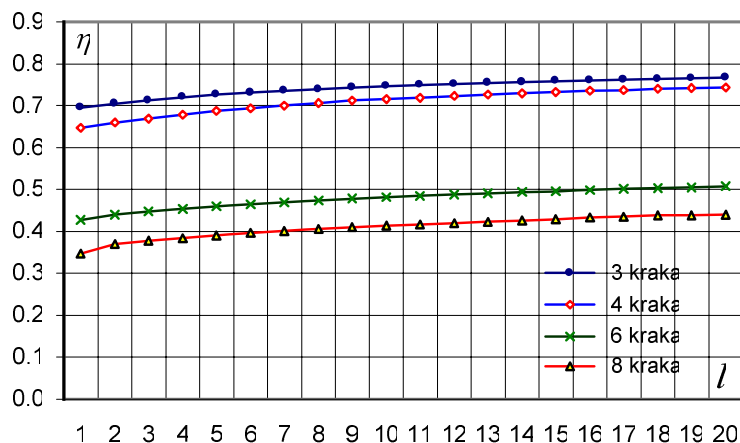


Слика 1.б



Слика 1.в

Решение:



Слика 2. Зависност $\eta = f(l)$

Табела 1. Резултати од пресметките со ZAZEM.xls

должина l (m)	трикрака звезда		четирикрака звезда		шесткрака звезда		осумкрака звезда	
	R_z (Ω)	η	R_z (Ω)	η	R_z (Ω)	η	R_z (Ω)	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

На сличен начин како и во претходната задача, со користење на програмата ZAZEM.xls, се пресметуваат отпорностите на распростирање на заземјувачите R_z , а потоа се добиваат и коефициентите на искористување за заземјувачите прикажани на сликата 2.

Добиените резултати од пресметките се прикажани во табелата 1 и на графикот од слика 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 ѕвезда 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.

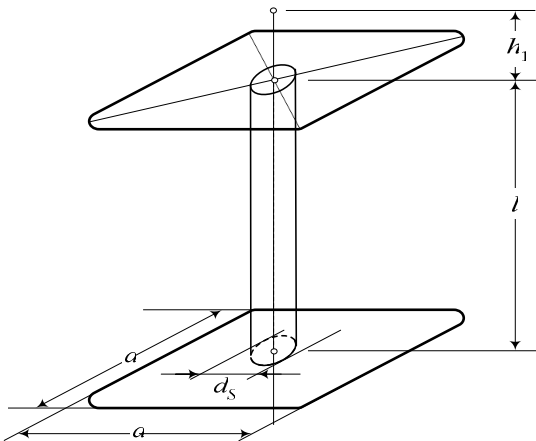
Во табела 1 се сместени резултатите од пресметките, односно отпорностите на распростирање за различни должини на краците и соодветните коефициенти на искористување.



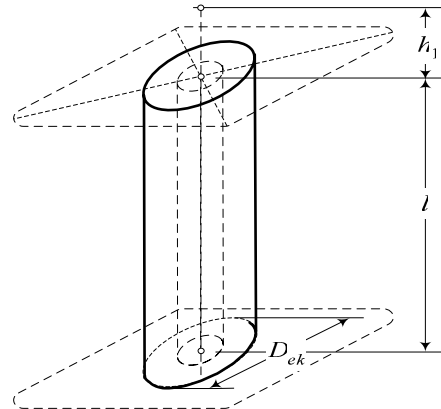
Задача 5. Се посматра заземјувачот прикажан на сликата 1 со кој што може да се апроксимира една ногара од 110 kV столб со расчленети темели. Прикажаниот заземјувач се состои од две хоризонтално поставени квадратни контури со страница a , изведени од челична поцинкувана лента FeZn 25×4 mm чијшто еквивалентен 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 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 1 во хомогено земјиште со специфична отпорност на распростирање $\rho = 100$ Ω m.

Потребно е:

- а) Да се пресмета отпорноста на распростирање на заземјувачот прикажан на сликата 1;
- б) каква е распределбата на струите на одведување на заземјувачот;
- в) Колкав е еквивалентниот пречник D_{ek} на цилиндерот со должина $l_{ek} = h_2 = 2,5$ m со кој што заземјувачот на стопата од сликата 1 може да се апроксимира со заземјувач во форма на еквивалентен цилиндер, според скицата од слика 2.



Слика 1.



Слика 2.

Решение:

а) Со помош на програмата ZAZEM.xls на едноставен начин може да се определи отпорноста на распростирање R_z , која во случајов изнесува $R_z = 13,592$ Ω . Внесувањето на елементите од заземјувачот (контурите и сондата) се врши на веќе познатиот начин. Горната контура, поставена на длабочина $h_1=0,5$ m, е опишана со точките M1:M4, вертикалната сонда со точките M5 и M6 и долната контура закопана на длабочина $h_1=2,5$ m, со точките M7:M10. Координатите на точките се прикажани во табела 1.

Табела 1. Координати на точките на заземјувачот

Точка	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10
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 ZAZEM.xls, е прикажана во табелата 2.

Табела 2 Распределба на струите во заземјувачот

Елемент	M1-M2	M2-M3	M3-M4	M4-M1	M5-M6	M7-M8	M8-M9	M9-M10	M10-M7
$I_{одв.}$ (%)	8,398	8,398	8,398	8,398	21,463	11,237	11,237	11,237	11,237

Според распределбата на струите на одведување, прикажана во табелата 2, 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 распостирање 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 распостирање 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 распостирање 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:

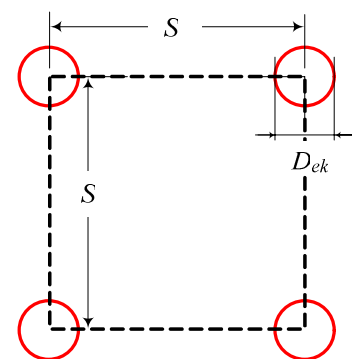
$$D_{ek} = \frac{4 \cdot l_{ek}}{\exp(2\pi \cdot l_{ek} \cdot R_Z / \rho)} = \frac{4 \cdot 2,5}{\exp(2\pi \cdot 2,5 \cdot 13,592 / 100)} = 1,182 \text{ m}$$

Значи еквивалентниот пречник на цилиндерот изнесува 84,5% од страницата a на контурите, т.е.:

$$D_{ek} = 0,845 \cdot a.$$



Задача 6. Со програмата "ZAZEM.xls" да се пресмета зависноста $R_Z = f(S)$ на отпорноста на распостирање на комплетниот заземјувач од типот "А" на еден 110 kV столб со расчленети темели (слика 1) кај кој секоја стопа, чијшто заземјувач има облик како на сл. 1 од задача 5, може да се апроксимира со соодветен заземјувач во форма на цилиндер од сликата 3.1.2, со исти димензии на стопите односно на еквивалентниот цилиндер $D_{ek} = 1,182 \text{ m}$. Потоа користејќи ги резултатите од претходната задача да се определи зависноста на коефициентот на искористување $\eta_s = f(S)$ помеѓу стопите од заземјувачот за големини на осното растојание помеѓу стопите во интервалот $S \in (2,5 \div 6,5) \text{ m}$. Резултатите од пресметките да се прикажат во табелата 4.1 и на соодветен дијаграм.



Слика 1. Заземјувач од типот "А" на еден 110 kV столб

Табела 1. Табеларен приказ на зависноста $\eta_S = f(S)$ 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)									
η									

Решение:

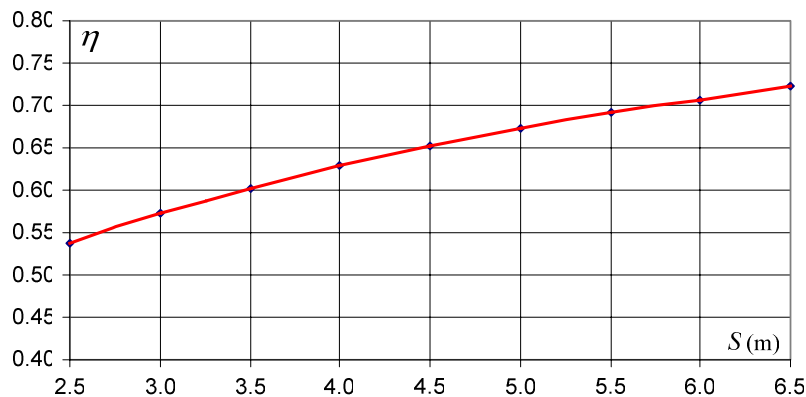
Пресметувањето на отпорноста на распространяње R_Z на заземјувачот се врши со помош на програмата ZAZEM.xls, а потоа, на сличен начин како во претходните задачи, се определува коефициентот на искористување η и тоа за различни вредности на растојанието S помеѓу стопите од столбот. Растојанијата кои овде се разгледуваат се оние кои се применуваат и во пракса, имајќи предвид дека тие се помали за пониските столбови, а поголеми (6÷6,5 m) за повисоките столбови.

Резултатите од пресметките се прикажани во табелата 1. и на дијаграмот од сликата 2.

Табела 1. Табеларен приказ на зависноста $\eta_S = f(S)$ 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

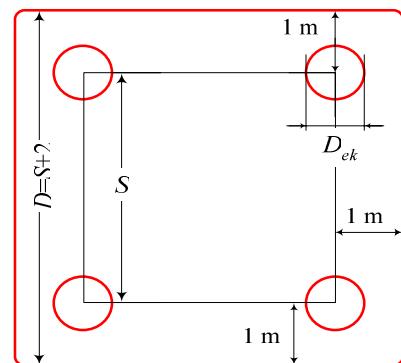
Дијаграмот на сликата 2 ја покажува зависноста $\eta_S = f(S)$, која е добиена од пресметките со помош на програмата ZAZEM.xls. Значи, за просечните вредности на растојанието помеѓу стопите S коефициентот на полезно дејство се движи во интервалот од 0,55 до 0,65, со просечна вредност $\eta=0,6$.



Слика 2. Зависност на коефициентот на искористување η од растојанието меѓу стопите S



Задача 7. Со помош на програмата "ZAZEM.xls" да се пресмета отпорноста на распространяње R_Z на заземјувачот од типот "В" (слика 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 ZAZEM.xls, да се определи и зависноста $R_Z = f(S)$ на отпорноста на распространяње на комплетниот заземјувач од типот "В" од растојанието S помеѓу стопите од столбот.



Слика 1. Заземјувач од типот "В" на еден 110 kV столб

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.

Со помош на програмата "ZAZEM.xls" се пресметува отпорноста на распростирање R_Z , која во случајов, кога растојанието помеѓу стопите е $S = 3,5$ m, изнесува $R_Z = 6,072$ Ω. Коефициентот на искористување η_{SP} во тој случај се добива врз основа на следната релација:

$$\eta_{SP} = \frac{R_{4S} \cdot R_P}{R_Z} = \frac{R_{4S} \cdot R_P}{(R_{4S} + R_P) \cdot R_Z} = 0,725, \quad (1)$$

каде што со R_{4S} е означена отпорноста на распростирање на заземјувачот составен само од 4 стопи, според сликата 2 од задачата бр.5, а со R_P е означена отпорноста на распростирање на правоаголниот прстен според сликата 1, кога е тој осамен во просторот.

Со програмата ZAZEM.xls, се определува и зависноста $R_Z = f(S)$, а потоа и зависноста $\eta = f(S)$. Резултатите од пресметките се сместени во табелата 1.

Табела 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
$R_{4S} \parallel R_P$ (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 $S = 6,5$ m, до 0,75 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 врз вредноста на отпорноста на распростирање на заземјувачот и без примена на компјутерска пресметка.



Задача 8. Столбовите од еден 20 kV надземен вод е предвидено да се заземјуваат со прстенести заземјувачи во форма на круг, изведени од поцинкувана чечечна 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 Ωm. За секој од нив да се пресмета потребниот пречник на кругот D така што отпорноста на распростирање на заземјувачот да изнесува $R_Z = 15$ Ω.

Решение:

Како што е познато, за пресметување на отпорноста R_Z на предвидениот заземјувач постои следната емпириска формула:

$$R_Z = \frac{\rho}{\pi^2 \cdot D} \cdot \ln \frac{4 \cdot D}{\sqrt{h \cdot d}}. \quad (1)$$

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 (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:

$$D_k = \frac{\rho}{\pi^2 \cdot R_z} \cdot \ln \frac{4 \cdot D_{k-1}}{\sqrt{h \cdot d}}; \quad k = 1, 2, \dots \quad (2)$$

која што произлегува од формулата (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:

$$D_0 = 1 \text{ m.}$$

Во случајот кога е $\rho = 100 \Omega\text{m}$, итеративниот процес на решавање би изгледал вака:

$$D_1 = \frac{\rho}{\pi^2 \cdot R_z} \cdot \ln \frac{4 \cdot D_0}{\sqrt{h \cdot d}} = \frac{100}{\pi^2 \cdot 15} \cdot \ln \frac{4 \cdot 1}{\sqrt{0,7 \cdot 0,022}} = 2,346 \text{ m};$$

$$D_2 = \frac{\rho}{\pi^2 \cdot R_z} \cdot \ln \frac{4 \cdot D_1}{\sqrt{h \cdot d}} = \frac{100}{\pi^2 \cdot 15} \cdot \ln \frac{4 \cdot 2,346}{\sqrt{0,7 \cdot 0,022}} = 2,922 \text{ m, итн.}$$

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.

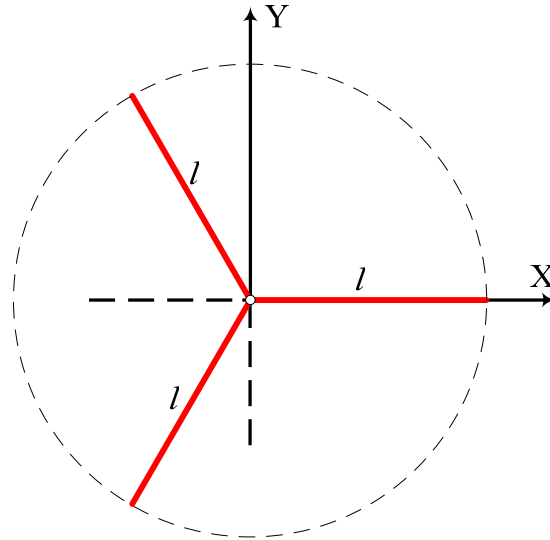
Табела 1. Зависност $D(\rho)$ кај хоризонтален заземјувач во форма на круг со пречник D

$\rho (\Omega\text{m})$	50 Ωm	100 Ωm	150 Ωm	200 Ωm	300 Ωm
D (m)	1,247	3,113	5,187	7,395	12,088



Задача 9. Зракаст заземјувач во форма на правилна трикрака ѕвезда (слика 1) е изведен од челична поцинкувана лента $\text{FeZn } 25 \times 4 \text{ mm}^2$ ($d = 18,5 \text{ mm}$), 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 $L_z = 3l = 30 \text{ m}$. Да се пресмета:

- а) отпорноста на распростирање R_z и со помош на полуемпирииската формула (1);
- б) отпорноста на распростирање R_z и со помош на програмата "ZAZEM.xls";
- в) да се изврши проценка на големината на грешката и да се даде соодветен коментар.



Слика 1. Зракаст заземјувач во форма на трикрака звезда

Решение:

Денес еден од најчесто применуваните начини за пресметување на отпорноста на распространување R_z на заземјувачите примената на некоја компјутерска програма каква што е, на пример, програмата "ZAZEM". 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 звезда, 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:

$$R_z = \frac{\rho}{2\pi L_\Sigma} \cdot \left(\ln \frac{L_\Sigma^2}{d \cdot h} + A_k \right) \quad (1)$$

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 табелата 1.

Табела 1. Зависност на коефициентот A_k од обликот на зракастиот заземјувач

двокрака звезда	трикрака звезда	четирикрака звезда	шестокрака звезда
$(A_k = 0,26)$	$(A_k = 0,87)$	$(A_k = 2,13)$	$A_k = 5,27)$

Значи, во конкретниот случај ($l = 10$ m, $L_\Sigma = 30$ m, $h = 0,7$ m, $d = 18,5$ mm), со помош на формулата (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 "ZAZEM" тогаш ќе добиеме: $R_z = 6,204 \Omega$.

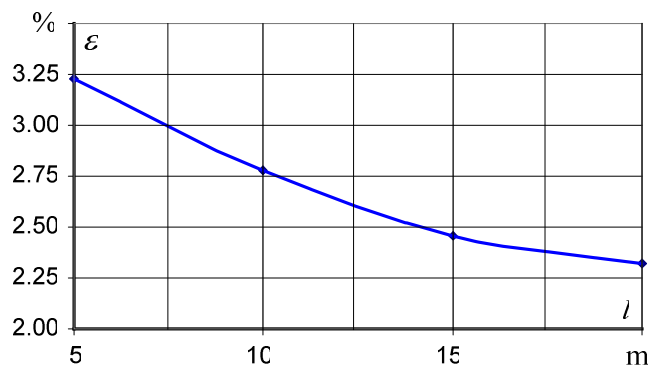
Ако истата постапка ја повториме и за други вредности на должината на краците l , ќе ги добиеме следните резултати:

Табела 2. Зависност $R_z(l)$ кај хоризонтален заземјувач во форма на трикрака ѕвезда

l (m)	5 m	10 m	15 m	20 m
R_z (Ω) добиена со (3.4.1)	11.276	6.376	4.536	3.554
R_z (Ω) добиена со "ZAZEM"	10.923	6.204	4.427	3.474
Грешка (%)	3.2	2.8	2.5	2.3

Од табелата 2 и од дијаграмот прикажан на сликата 2 можеме да заклучиме дека, кога се работи за хоризонтален заземјувач во форма на трикрака ѕвезда, емпириската формула (1) дава резултати со сосема слични со оние добиени со програмата "ZAZEM" и кои можеме да ги сметаме за "точни". Значи, точноста на изразот (1) е сосема задоволителна.

На сликата 2 е графички прикажана зависност на големината на грешката ε , изразена во (%), од должината на краците од трикраката ѕвезда l .

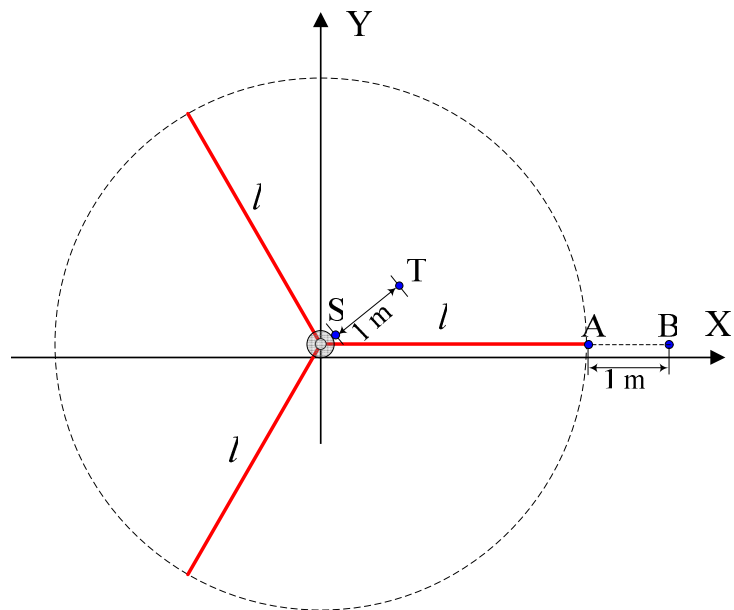


Слика 2. Зависност на грешката (%) од должината $l(m)$ на краците на ѕвездата

■ ■ ■

Задача 10. Зракаст заземјувач во форма на правилна трикрака ѕвезда (слика 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 $L_z = 3l = 30 \text{ m}$. 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 $E_{d,\text{max}}$ и чекор $E_{c,\text{max}}$, во (V) и во (%) од напонот на заземјувачот U_z ;
- распределбата на потенцијали по површината од земјата $\phi(x)$ по должината на X-оската.



Слика 1. Заземјувач во форма на трикрака ѕвезда и карактеристични точки

Решение:

а) Пресметка на отпорноста на распространување R_Z и напонот U_Z .

Врз основа на пресметките изведени во претходната задача, за отпорноста на распространување R_Z се добива:

$$R_Z = 6,204 \Omega,$$

додека за напонот на заземјувачот ќе добиеме:

$$U_Z = R_Z I_Z = 6,204 \cdot 60 = 372,4 \text{ V}.$$

б) Пресметка на најголемиите 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 $x_T = r \cdot \cos(\pi/3) = 0,550 \text{ m}$; $y_T = r \cdot \sin(\pi/3) = 0,953 \text{ m}$ 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 T . Нејзината вредност, во согласност со релацијата (3.21) ќе биде:

$$r_{jT} = \alpha_{jT} = \frac{\rho}{4\pi l_j} \cdot \ln \frac{R_{1T} + R_{2T} + l_j}{R_{1T} + R_{2T} - l_j}. \quad (1)$$

Во оваа релација со R_{1T} е означено растојанието помеѓу почетокот од елементот j и точката T , додека со R_{2T} е означено растојанието помеѓу крајот од елементот j и точката T .

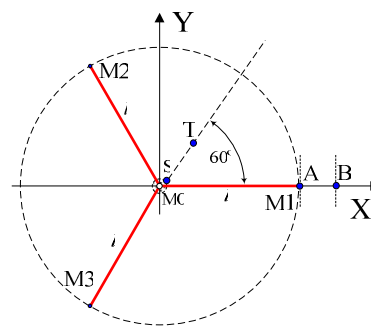
Нека со M_0 ја означиме точката која што е заедничка за сите три елементи од заземјувачот, а со M_1 , M_2 и M_3 ги означиме точките што лежат на спротивните краишта од секој од елементите j ($j = 1, 3$), како што е тоа прикажано на сликата 2. Тогаш, во согласност со оваа слика, координатите на точката M_2 , на пример, ќе бидат:

$$x_{M_2} = l \cdot \cos(\pi/3) = 10 \cdot \cos(\pi/3) = -5 \text{ m}; \quad y_{M_2} = l \cdot \sin(\pi/3) = 8,66 \text{ m}; \quad z_{M_2} = -h = -0,7 \text{ m}.$$

На сличен начин ги определуваме и координатите на преостанатите точки од заземјувачот, Тие се прикажани во табелата 1.

Табела 1. Координати на одделните точки од заземјувачот и на карактеристичните точки

Точка	x (m)	y (m)	z (m)
M0	0,00	0,00	-0,70
M1	10,00	0,00	-0,70
M2	-5,00	8,66	-0,70
M3	-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



Слика 2

Растојанијата R_{1T} и R_{2T} од точката Т до обата краја на елементот j ($j = 1, 3$) што фигурираат во (2), ќе се добијат со примена на општата формула (3) за растојание R_{pq} помеѓу две точки, P и Q:

$$R_{pq} = \sqrt{(x_q - x_p)^2 + (y_q - y_p)^2 + (z_q - z_p)^2}. \quad (3)$$

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 M0 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 M1 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 M2 и M3:

$$R_{2T} = \sqrt{(0,55 - 5)^2 + (0,95 - 8,66)^2 + (0 + 0,7)^2} = 8,93 \text{ m},$$

$$R_{3T} = \sqrt{(0,55 + 5)^2 + (0,95 + 8,66)^2 + (0 + 0,7)^2} = 11,12 \text{ m}.$$

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:

$$\varphi_T(2) = \varphi_T(2') = \frac{\rho \cdot I_z}{4\pi l} \cdot \ln \frac{R_{0T} + R_{2T} + l}{R_{0T} + R_{2T} - l} = \frac{100 \cdot 20}{4\pi \cdot 10} \cdot \ln \frac{1,3 + 8,93 + 10}{1,3 + 8,93 - 10} = 71,25 \text{ V};$$

$$\varphi_T(3) = \varphi_T(3') = \frac{\rho \cdot I_z}{4\pi l} \cdot \ln \frac{R_{0T} + R_{3T} + l}{R_{0T} + R_{3T} - l} = \frac{100 \cdot 20}{4\pi \cdot 10} \cdot \ln \frac{1,3 + 11,12 + 10}{1,3 + 11,12 - 10} = 35,43 \text{ V}.$$

$$\varphi_T = 2 \cdot [\varphi_T(1) + \varphi_T(2) + \varphi_T(3)] = 2 \cdot (51,48 + 71,25 + 35,43) = 316,32 \text{ V}.$$

Сега можеме да ја пресметаме најголемата потенцијална разлика на допир $E_{d.\max}$:

$$E_{d.\max} = \varphi_S - \varphi_T = U_Z - \varphi_T = 372,24 - 316,32 = 55,92 \text{ V или}$$

$$E_{d.\max} \% = \frac{E_{d.\max}}{U_Z} \cdot 100 = \frac{55,92}{372,24} \cdot 100 = 15\%.$$

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 (сл. .2).

Потенцијалите φ_A и φ_B , во овие точки се пресметуваат на сосема идентичен начин како и во претходниот случај со точката T. На тој начин за потенцијалите во овие две точки добиваме:

$$\varphi_A = 2 \cdot \sum_{j=1}^3 \varphi_A(j) = 106,94 + 34,51 + 24,41 = 165,86 \text{ V};$$

$$\varphi_B = 2 \cdot \sum_{j=1}^3 \varphi_B(j) = 73,07 + 31,93 + 22,69 = 127,69 \text{ V};$$

$$E_{AB} = \varphi_A - \varphi_B = 165,86 - 127,69 = 38,17 \text{ V или}$$

$$E_{AB} \% = \frac{E_{AB}}{U_Z} \cdot 100 = \frac{38,17}{372,24} \cdot 100 = 10,3\%.$$

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 T1 и T2 кои што се наоѓаат на растојание 0,5 и 1,5 m од координатниот почетокот (види слика 3) и изнесува:

$$E_{T1-T2} = \varphi_{T1} - \varphi_{T2} = 308 - 256 = 52 \text{ V или}$$

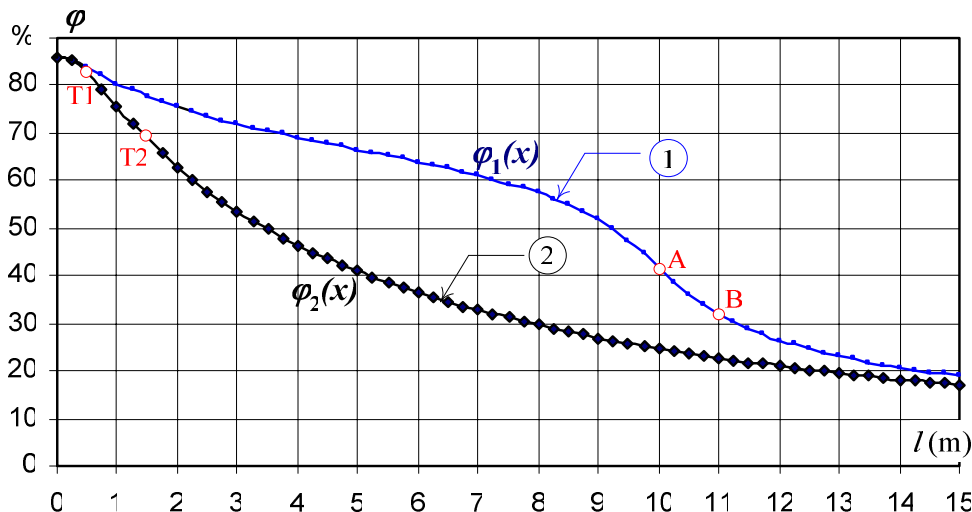
$$E_{T1-T2} \% = \frac{E_{T1-T2}}{U_Z} \cdot 100 = \frac{52}{372,24} \cdot 100 = 14\%.$$

Според тоа најголемата потенцијална разлика на чекор за овој заземјувач ќе биде:

$$E_{c,max} = \varphi_{T1} - \varphi_{T2} = 308 - 256 = 52 \text{ V } (E_{c,max} \% = 14\%).$$

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 $\varphi_1(x)$, прикажана на сликата 3. На истата слика е прикажана и кривата $\varphi_2(x)$ која ја претставува распределбата на потенцијалите по површината од земјата по должината на симетралата од правата што ги поврзува точките 0 и T. Пресметките се извршени со помош на програмата "ZAZEM".



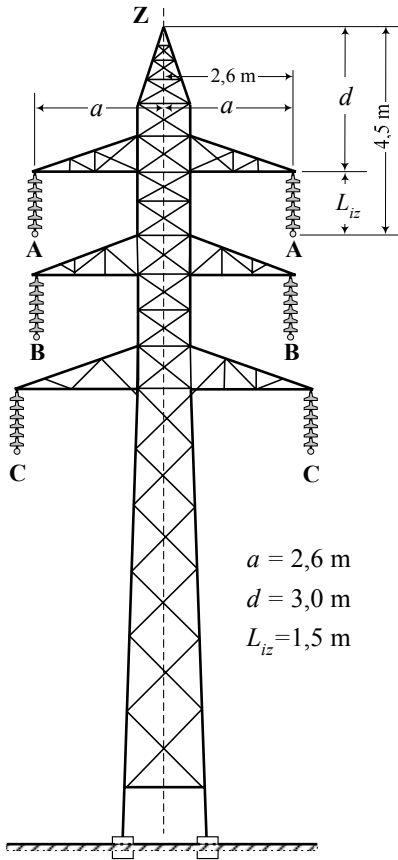
Слика 3. Распределба на потенцијалите по површината од земјата



Задача 11. На сликата 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 $2 \times 3 \times \text{Al}/\text{C } 240/40 \text{ mm}^2$ и со заштитно јаже тип Fe II 50 mm^2 . Да се

пресмета редукиониот фактор r_f на овој вод. Колкава емс 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 11

Редукиониот фактор на еден надземен вод се дефинира со помош на изразот (1):

$$r_f = 1 - \frac{Z_m}{Z_s} \quad (1)$$

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 (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 Карсон–овиот модел, со помош на следните релации:

$$z_s = (r_z + \frac{1000 \cdot \rho_{Fe}}{S_{Fe}}) + j(0,1445 \cdot \log \frac{D_e}{r_{z.j}} + 0,0157 \cdot \mu_r) \quad (2)$$

$$z_m = r_z + j \cdot 0,1445 \cdot \log \frac{D_e}{D_m} \quad (3)$$

каде што е:

- $r_z = 0,05 \Omega/\text{km}$ е еквивалентната отпорностна повратниот пат на струјата во земјата,
- D_{ek} е 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 $D_e = 930,6 \text{ m}$;
- ρ_{Fe} е специфична отпорност по единица должина на челикот од којшто е изработено заштитното јаже, при што за споменатиот тип челик Fe II тој изнесува $\rho_{Fe} = 0,21 \Omega/\text{m}$;
- $r_{z.j}$ е радиус (полупречник) на заштитното јаже, ($r_{z.j} = 4,5 \text{ mm}$);
- S_{Fe} е пресек на заштитното јаже ($S_{Fe} = 49,48 \text{ mm}^2$);
- μ_r е релативна магнетска пермиабилност на заштитното јаже ($\mu_r = 30$ за заштитно јаже во заситена магнетска состојба);
- D_m е 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 9.1 ($a = 2,6 \text{ m}$; $d = 3,0 \text{ m}$; $L_{iz} = 1,5 \text{ m}$ = 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:

$$\underline{z}_s = \underline{z} = (r + jx) = \left(0,05 + \frac{1000 \cdot \rho_{Fe}}{S_{Fe}} \right) + j \left(\log \frac{2 \cdot D_e}{d_{z.j.}} + 0,0157 \cdot \mu_r \right) = (4,24 + j1,24) \Omega / \text{km}. \quad (4)$$

или

$$\underline{z}_s = 4,418 \cdot e^{j16,3^\circ} \Omega / \text{km}.$$

На тој начин, со замена на вредностите за D_e и D_m во (3), за меѓусебната импеданција \underline{z}_m се добива:

$$\underline{z}_m = 0,308 \cdot e^{j80,7^\circ} \Omega / \text{km},$$

додека со замена на добиените вредности за \underline{Z}_m и \underline{Z}_s , во (1) за редуциониот фактор на водот добиваме:

$$\frac{\underline{z}_m}{\underline{z}_s} = \frac{0,308 \cdot e^{j80,7^\circ}}{4,418 \cdot e^{j16,3^\circ}} = 0,07 \cdot e^{j64,4^\circ}$$

$$r_f = 1 - \frac{\underline{Z}_m}{\underline{Z}_s} = (0,9706 - j0,06241) = 0,97623 \cdot e^{-j3,68^\circ}.$$

Во еден распон со должина $a = 300$ m во заштитното јаже ќе се индуцира под дејство на струјата на кусата врска I_{KV} емс \underline{E}_r :

$$\underline{E}_r = \underline{Z}_m \cdot \underline{I}_{KV} = \underline{z}_m \cdot a \cdot \underline{I}_{KV},$$

од каде што се добива:

$$E_r = 0,308 \cdot 0,3 \cdot 1 = 0,0924 \text{ kV} \equiv 92,4 \text{ V}$$

■ ■ ■

2. Домашни задачи за студентите

Презиме и име на студентот	φ (°)	l (m)	ρ (Ωm)	$a=b$ (m)
	10	5	50	5
	15	5	60	5
	20	5	70	8
	25	5	80	8
	30	10	90	10
	35	10	100	10
	40	10	150	12
	45	10	200	12
	50	12	250	15
	55	12	300	15
	60	10	150	12
	65	10	200	12
	70	12	250	15
	80	12	300	15

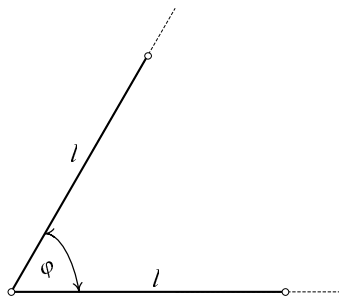
1. Задача. Се посматраат две линиски електроди изведени од бакарно јаже $\text{Cu } 50 \text{ mm}^2$; $d=9 \text{ mm}$) како на сликата 1. Аголот φ помеѓу електродите изнесува $\varphi = \underline{\hspace{1cm}}$ °. Должината на секоја од електродите изнесува $l = \underline{\hspace{1cm}}$ m и тие се поставени во неограничена спроводна средина. Да се пресмета меѓусебната отпорност α_m :

а) со помош на Цејлиновите формули;

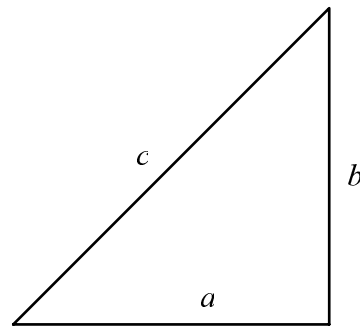
б) нумерички, како во примерот 2.1, работејќи притоа со $n_t = 5$ точки.

в) со помош на програмата ALFAsm.xls, повтрно работејќи со $n_t = 5$ точки.

Резултатите од пресметките да се сместа во една табела.



Слика 1



Слика 2

2. Задача. Се посматра хоризонтален заземјувач во форма на рамнокрак правоаголен триаголник со катети: $a = b$ и хипотенуза c ($c = \sqrt{a^2 + b^2}$), поставен во неограничена спроводна средина со специфична отпорност $\rho = \underline{\hspace{1cm}}$ Ωm . Сите елементи (електроди) од заземјувачот се спроводници во форма на јаже со еквивалентен пречник $d = 9 \text{ mm}$. Потребно е:

1) да се пресмета матрицата на сопствените и меѓусебните отпорности $[r]$;

2) да се пресмета отпорноста на распростирање на заземјувачот R_z како и неговиот потенцијал U_z , ако струјата на одведување во земјата изнесува $I_z = 100 \text{ A}$.

3) струите на одведување во земјата I_a , I_b и I_c од поедините страници на триаголникот.

3. Задача. Да се формира матрицата $[r]$ на заземјувач во форма на квадрат со страница a , поставен во неограничена хомогена спроводна средина со специфична отпорност ρ . Заземјувачот е изведен од бакарно јаже со пресек $S_{Cu} 50 \text{ mm}^2$ и пречник $d = 9 \text{ mm}$. Потребно е да се пресмета:

а) Колкава ќе биде отпорноста на распростирање на заземјувачот R_Z во наведените услови.

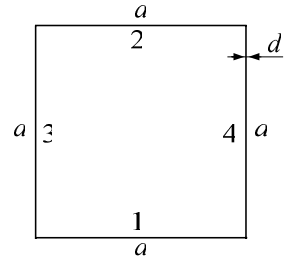
б) Заземјувачот е поставен во земја на длабочина $h = 1 \text{ m}$. Колкава е отпорноста на распростирање на заземјувачот R_Z во овој, реален, случај.

в) Колкав е потенцијалот φ_T во тежиштето T од квадратот а колкав во точката на површината од земјата T_0 над самото тежиште.

Струјата на одведување во земја изнесува $I_Z = 100 \text{ A}$.

Бројни вредности: Величините a и ρ се отчитуваат од горната табела.

Напомена. Првиот дел од задачата (пресметување на елементите од матрицата $[r]$) да се изврши со примена на програмата "ALFAsm.xls", додека вториот, преостанат, дел, рачно, со помош на дигитрон, земајќи предвид дека струите на одведување I_i ($i = 1, 4$) за сите елементи од заземјувачот се исти и изнесуваат по 25% од вкупната струја на одведување I_Z .



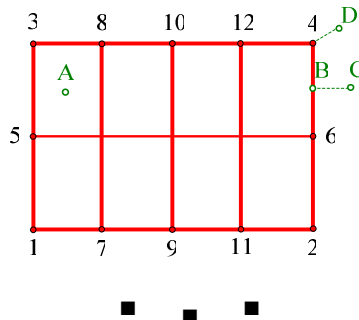
Слика 3

4. Задача. Да се пресмета на која длабочина h_x потенцијалот во точката T_x што лежи на нормалата која што минува низ тежиштето на квадратот од задачата 3 добива вредност 10% од напонот на заземјувачот U_Z . Од добиениот резултат да се оцени до која длабочина треба да се мери специфичната отпорност на плото ρ за да може правилно да се пресмета отпорноста на распростирање на идниот заземјувач.



3. Задачи од областа на заземјување на ТС ВН/ВН и ВВ/СН

Задача 1*. Мрежест заземјувач изведен од Cu јаже 70 mm^2 ($d = 10,6 \text{ mm}$) поставено на длабочина $h = 0,8 \text{ m}$, има димензии $a \times b = 60 \times 40 \text{ m}$ и геометрија идентична со заземјувачот од конфигурацијата К5 во вежбата В6 од четвртиод дел (задачи за лабораториски вежби). Во услови на земјоспој од мрежестиот заземјувач се одведува струја во земјата $I_{MZ} = 1,2 \text{ kA}$. Специфичната отпорност на тлото изнесува $\rho = 60 \Omega\text{m}$. Околу заземјувачот е поставена метална ограда која што има сопствен заземјувач изведен од лента FeZn 30×4 , поставен на длабочина $h_1 = 0,5 \text{ m}$ и растојание 1 m од оградата, На тој начин заземјувачот на оградата се наоѓа на оддалеченост од 10 m од секоја од надворешните страни на мрежестиот заземјувач. Потребно е да се пресмета пренесениот потенцијал од мрежестиот заземјувач на оградата за дадената конфигурација, како и распределбата на струите (во %). Задачата да се реши со користење на програмата SPREGNATI_ZAZEMJUVACI.



Задача 2*. Да се изврши приближна пресметка на отпорноста на распростирање на мрежестиот заземјувач од задачата 1* со помош на: а) Лореновите формули (5.3) и (5.4) и б) со формулата на Нахман (5.8). Резултатите од пресметките да се споредат со "точната вредност" добиена во претходната задача со помош на програмата MrezZaz.xls. Да се даде коментар за големината на грешката и на употребливоста на приближните емпириски формули.



Задача 3*. Со помош на емпириските релации (5.18) – (5.20) да се процени вредноста на отпорноста на распростирање R_{MZ} на мрежестиот заземјувач од задачата 1* за случајот кога земјиштето во кое што се наоѓа претставува двослој со параметри: $H = 2 \text{ m}$; $\rho_1 = 60 \Omega\text{m}$ и $\rho_2 = 300 \Omega\text{m}$.



Задача 4*. Мрежест заземјувач од една ТС ВН/СН со правоаголен облик и димензии $a \times b = 100 \times 50 \text{ m}$ е треба да биде изведен со бакарно јаже со пресек Cu 70 mm^2 , ($d = 10,6 \text{ mm}$) закопано во хомогено тло со отпорност $\rho = 100 \Omega\text{m}$, на длабочина $h = 0,8 \text{ m}$. Познато е дека за време на земјоспој во ВН мрежа најголемата вредност на напонот на заземјувачот изнесува $U_z = 1000 \text{ V}$. Густината на електродите во мрежата не е однапред позната, т.е. бројот на хоризонталните елементи n_h и бројот на вертикалните елементи n_v треба да се одбере така што најголемиот напон на допир, кој што е критичен за димензионирањето на густината на електродите од заземјувачот и димензиите на окцата, не смее да биде поголем од 160 V што одговара на дозволената вредност на напонот на допир $U_{d.doz}$ за времетраење на грешката од $t = 0,5 \text{ s}$. Задачата да се реши со пребарување, тргнувајќи од вредноста $n_h = 3$ па сè додека не се постигне задоволување на бараниот услов. Заради поедноставување на пресметките да се усвои дека окцата во мрежата имаа квадратна форма, т.е. дека важи условот $n_v = 2 \cdot n_h$.



4. Задачи за лабораториски вежби

1. Вежба. Работи со програмата "ZAZEM". (file = "ZAZEM-LENTA.xls")

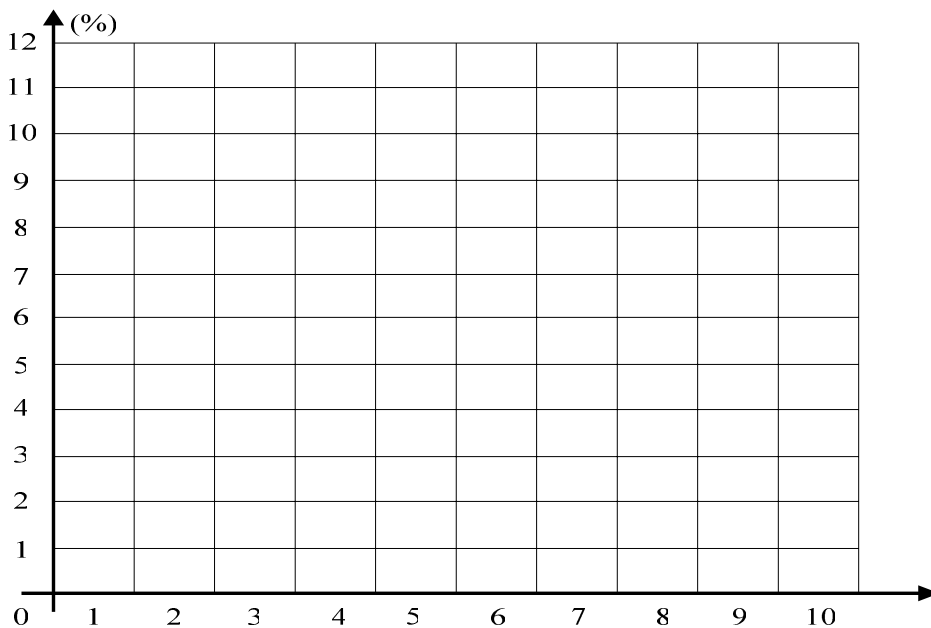
Цел на вежбата: Запознавање и работа со програмата "ZAZEM". Хоризонтален заземјувач.

Се посматра заземјувачот од примерот 3.6 во форма на лента со должина $l = 10$ m закопан на длабочина $h = 1$ m во хомогено тло со специфична отпорност $\rho = 300$ Ω m. Заземјувачот е изведен од бакарно јаже со пресек $\text{Cu}50$ mm^2 и пречник $d = 9$ mm. Струјата на одведување во земја од заземјувачот изнесува $I_z = 20$ A. Заземјувачот треба да се моделира како множество од $n = 10$ линиски сегменти, секој со должина од по 1 m. Почетната и крајната точка на заземјувачот имаат координати: A(0, 0, -1) и B(10, 0, -1). Така моделираниот заземјувач да се реши, т.е. да се пресмета:

- отпорноста на распростирање R_z . Добиениот резултат да се спореди со оној добиен во примерот 3.6. Како се тумачи малата разлика во добиените вредности за R_z ?
- распределбата на струите на одведување од поедините сегменти на заземјувачот и за секој од нив да се пресмета линиската густина на одведување j (A/m). Резултатите од пресметките да се сместат во табела и да се прикажат графички. Да се даде објаснение на добиените резултати.
- најголемата потенцијална разлика на допир како разлика од потенцијалите на столбот $U_z = R_z I_z$ и потенцијалот φ_D во точката D со координати $x_D = 1,2$ m и $y_D = 0$, која се наоѓа на растојание од 1,1 m од него.
- да се пресмета најголемата потенцијална разлика на чекор $E_{c,\max(X)}$ во правец на X-оската;
- да се пресмета најголемата потенцијална разлика на чекор $E_{c,\max(Y)}$ во правец на Y-оската и тоа на средината од заземјувачот, по должината на отсечката PQ што лежи на површината од земјата дефинирана со точките P и Q со координати: $x_P = 5$ m; $y_P = -5$ и $x_Q = 5$ m; $y_Q = 5$ m.

Табела В1. Табеларен приказ на распределбата на струите на одведување по сегменти од заземјувачот

сегмент k	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
I_k (A)										
j_k (A/m)										



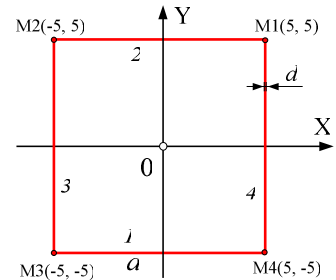
Слика В1. Графички приказ на распределбата на струите на одведување по сегменти од заземјувачот

2. Вежба. Работна со програма "ZAZEM". (file = "ZAZEM-KVADRAT.xls")

Се посматра заземјувачот од примерот 3.5 во форма на квадрат со страница $a = 10 \text{ m}$ закопан на длабочина $h = 1 \text{ m}$ во хомогено тло со специфична отпорност $\rho = 100 \Omega\text{m}$. Заземјувачот е изведен од бакарно јаже со пресек $\text{Cu}50 \text{ mm}^2$ и пречник $d = 9 \text{ mm}$.

Со помош на програмата "ZAZEM" да се пресмета:

- а) колкава ќе биде отпорноста на распространување на заземјувачот R'_Z ;
- б) колкав ќе потенцијалот φ_T во тежиштето T од квадратот а колкав во точката на површината од земјата T0 над самото тежиште;
- в) распределбата на потенцијалите по должината на отсечката PQ што лежи на површината од земјата дефинирана со точките P и Q со координати: $x_P = -8 \text{ m}$; $y_P = 0$ и $x_Q = 8 \text{ m}$; $y_Q = 0$.



Слика В2

Да се изврши параметарска анализа на зависноста $R_Z = f(h)$ и $E_{c,max} = f(h)$ за $a = 10 \text{ m}$ и за длабочини $h = 0,5; 0,8$ и 10 m . Резултатите од пресметките да се прикажат во следната табела.

Табела В2. Резултати од пресметките на заземјувач во форма на квадрат

$h \text{ (m)}$	$R_Z \text{ (}\Omega\text{)}$	$\varphi_{T0} \text{ (}\%\text{)}$	$E_{c,max} \text{ (}\%\text{)}$
0,5			
0,8			
1,0			

3. Вежба. Моделирање на круж со програма "ZAZEM". (file = "ZAZEM-KRUG8.xls").

Цел на вежбата: Моделирање на круж и пресметка на карактеристики на кружен заземјувач.

Да се изврши моделирање на заземјувач од јаже $\text{Cu}50 \text{ mm}^2$ во форма на круг со параметри пречник $D = 2 \cdot R = 10 \text{ m}$; $d = 9 \text{ mm}$, закопан во хомогено тло со специфична отпорност $\rho = 100 \Omega\text{m}$ на длабочина $h = 0,8 \text{ m}$. Кругот да се апроксимира со еден правилен осмоаголник со страница $a = D \cdot \sin(\alpha/2)$; $\alpha = \pi/8 \approx 22,5^\circ$ така што координатите на темињата од осмоаголникот бидат опишани со следниот алгоритам:

$$\varphi_k = (k - 1) \cdot \pi/8; \quad x_k = R \cdot \cos \varphi_k; \quad y_k = R \cdot \sin \varphi_k; \quad z_k = -h; \quad k = 1, 2 \dots 8.$$

Потребните податоци со кои се опишува кругот, дефинирани на тој начин, да се внесат во првиот работен лист од Excell-програмата "ZAZEM.xls" и потоа да се пресмета вредноста R_Z на отпорноста на распространување на заземјувачот како и најголемите потенцијални разлики на допир и чекор $E_{d,max}$ и $E_{c,max}$. Потенцијалната разлика на допир $E_{d,max}$ се добива како разлика на потенцијалот на столбот φ_s (100%) кој што се наоѓа во центарот на кругот и потенцијалот на точката која што се наоѓа на растојание $1,1 \text{ m}$ од центарот на кругот при што е земено дека пречникот на столбот изнесува $d_s = 0,2 \text{ m}$.

За колку проценти ќе се промени вредноста R_Z ако заземјувачот биде изведен со бакарно јаже со пресек $\text{Cu}70 \text{ mm}^2$ и пречник $d = 10,6 \text{ mm}$. Да се даде коментар на добиениот резултат.

Да се пресмета вредноста на отпорноста на распространување на заземјувачот R_Z и за случајот $d = 9 \text{ mm}$ кога длабочината на закопување изнесува $h = 0,5; 0,8$ и $1,0 \text{ m}$. Колкави ќе бидат најголемите потенцијални разлики на допир и чекор $E_{d,max}$ и $E_{c,max}$. Резултатите да се прикажат табеларно (табела В3). Да се даде коментар на добиениот резултат.

Табела В3. Резултати од пресметките на заземјувач во форма на круг со пречник $D = 10 \text{ m}$

$h \text{ (m)}$	$R_Z \text{ (}\Omega\text{)}$	$E_{d,max} \text{ (}\%\text{)}$	$E_{c,max} \text{ (}\%\text{)}$
0,5			
0,8			
1,0			

4. Вежба. Работи со програмата "ZAZEM". (file = "ZAZEM-KRUG8.xls").

Цел на вежбата: Споредба на резултатите за кружен заземјувач добиени со програмата "ZAZEM" и со аналитичката формула.

Со помош на моделот на кругот од претходната вежба 3 да се пресмета отпорноста на распространување на заземјувачот R_Z како и најголемите потенцијални разлики на допир и чекор $E_{d,max}$ и $E_{c,max}$ за следните вредности на неговиот пречник D : 2, 4, 6 8 и 10 m. Резултатот од пресметката на отпорноста R_Z да се спореди со резултатот R_Z^* што го дава аналитичката формула (B4.1) за пресметка на отпорноста на распространување на заземјувач во форма на круг:

$$R_Z^* = \frac{\rho}{\pi^2 \cdot D} \cdot \ln \frac{4 \cdot D}{\sqrt{h \cdot d}}. \quad (B4.1)$$

Обата резултата да се прикажат во долната табела B4. Големината на грешката $\epsilon\%$ при пресметката на отпорноста на распространување R_Z што се добива со помош на програмата "ZAZEM", третирајќи го притоа резултатот добиен со формулата (B4.1) како "точен", да се прикажат, исто така, во табелата B4:

Табела B4. Резултати од пресметките и споредбите во вежбата бр. 4

D (m)	R_Z (Ω)	R_Z^* (Ω)	$\epsilon\%$	$E_{d,max}$ (%)	$E_{c,max}$ (%)
2,0					
4,0					
6,0					
8,0					
10,0					

5. Вежба. Работи со програмата "ZAZEM". (file = "ZAZEM-KVADRAT.xls")

Цел на вежбата: Споредба на резултатите за квадратен заземјувач добиени со програмата "ZAZEM", со апроксимацијата на квадратот во еквивалентен круг со ист периметар и со аналитичката формула (B5.1).

Со помош на програмата "ZAZEM.xls" да се пресмета отпорноста на распространување на заземјувач во форма на квадрат. Да се оцени колку е успешна апроксимацијата на заземјувачот во форма на квадрат со соодветен заземјувач во форма на круг со ист периметар $D=4 \cdot a/\pi = 1,273 \cdot a$ од аспект на пресметување на неговата отпорност на распространување R'_Z со помош на формулата (B4). Во таа смисла да се оцени колку е успешна формулата (B5) за пресметка на отпорноста R''_Z на правоаголник со страници a и b . Споредбите да се направат за следните вредности на страницата a на квадратот: $a = 2$ m; $a = 5$ m и $a = 10$ m.

$$R_Z^{**} = \frac{\rho}{2\sqrt{a \cdot b}}. \text{ За } a = b \text{ важи: } R_Z^{**} = \frac{\rho}{2 \cdot a}. \quad (B5.1)$$

Резултатите да се прикажат во следната табела.

Табела B5. Резултати од пресметките на заземјувач во форма на квадрат

a (m)	R_Z (Ω) добиен со ZAZEM	R_Z^* (Ω) добиен со (B4.1)	R_Z^{**} (Ω) добиен со (B5.1)
2			
5			
10			

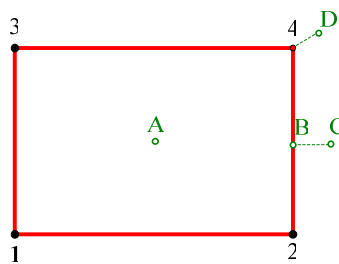
6. Вежба. Работна со програма "ZAZEM". (file = " MrezZaz.xls")

Цел на вежбаа: Испишување на карактеристиките на мрежест заземјувач.

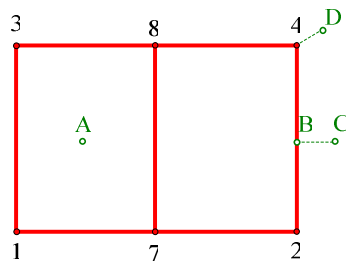
На сликата В6 е се прикажани шест можни конфигурации на мрежест заземјувач наменет за заземјување на разводна постројка висок/среден напон (на пример 110/35 kV или 110/10 kV) која опфаќа правоаголна површина со димензии $a \times b = 60 \times 40$ m. Секој од заземјувачите е изведен од бакарно јаже со пресек $S_{Cu} = 70 \text{ mm}^2$ и пречник $d = 10,6 \text{ mm}$, закопано на длабочина $h = 1 \text{ m}$ во хомогено тло со специфична отпорност $\rho = 60 \Omega \text{ m}$.

За секоја од предвидените конфигурации, со помош на програмата "ZAZEM.xls", да се пресметаат нивните основни карактеристики: отпорноста на распростирање R_Z и најголемите потенцијални разлики на допир и чекор $E_{d,max}$ и $E_{c,max}$, изразени во проценти. Најголемата потенцијална разлика на допир се добива во точката А, како разлика на потенцијалите $E_{d,max} = U_Z - \varphi_A$ или $E_{d,max} \% = 100 - \varphi_A \%$. Најголемата потенцијална разлика на чекор треба да се бара како разлика на потенцијалите помеѓу точките В и С или точките 4 и Д.

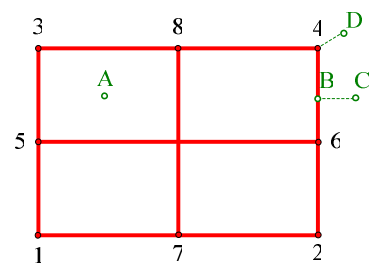
Резултатите од пресметките да се приложат во табелата В6.



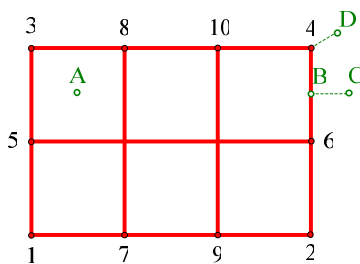
Конфигурација K1



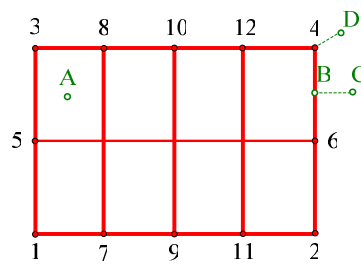
Конфигурација K2



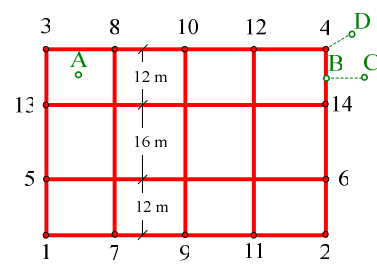
Конфигурација K3



Конфигурација K4



Конфигурација K5



Конфигурација K6

Табела В6. Резултати од пресметките на разгледуваните мрежести заземјувачи

Конфигурација	$R_Z (\Omega)$	$E_{d,max} (\%)$	$E_{c,max} (\%)$
Конфигурација K1			
Конфигурација K2			
Конфигурација K3			
Конфигурација K4			
Конфигурација K5			
Конфигурација K6			

7. Вежба. Програм "ZAZEM" Примена на вертикални сонди. (file = "MrezZaz.xls")

Да се испита дали и за колку ќе се подобрат перформансите на заземјувачот од конфигурацијата K2 ако во секоја од пресечните 6 точки 1, 2, 3, 4, 7, и 8 на заземјувачот му се додаде по една вертикална сонда со должина $l_s = 3$ m така што нејзиниот горен раб се наоѓа на длабочина h , додека долниот раб од сондата се наоѓа на длабочина $h+l_s$.

8. Вежба. Работи со програмой "ZAZEM". (file = "MrezZaz.xls")

Цел на вежбата: Избор и димензионирање на мрежесті заземјувач.

Врз основа на резултатите добиени во вежбата бр. 6 да се предложи скица на заземјувачот на постројката ВН/СН. Струјата на земјоспој (еднофазна куса врска) изнесува $I_z = 1,2$ kA. Времето на исклучување на кусата врска изнесува $t = 0,25$ s.

Послѐајка:

1. Ойределување на дозволеніиј напон на допир $U_{d,doz}$ и дозволеніиј поштенцијална разлика на допир $E_{d,doz}$.

Бидејќи напонот на допир во постројката ќе биде поголем од напонот на чекор, димензионирањето ќе го вршиме според дозволените напони на допир. Затоа, најнапред, со помош на дијаграмот од сл. 1.8, за времетраењето на кусата врска $t = 0,25$ s ја отчитуваме дозволената вредност на напонот на допир $U_{d,doz} = 230$ V. Потоа со помош на релацијата (1.9) ја пресметуваме вредноста на факторот на допир s_d :

$$s_d = 1 + 1,5 \cdot \rho \cdot 10^{-3} = 1 + 1,5 \cdot 60 \cdot 10^{-3} = 1,09.$$

Според тоа дозвлената потенцијална разлика на допир ќе биде:

$$E_{d,doz} = U_{d,doz} \cdot s_d = 230 \cdot 1,09 = 251 \text{ V}.$$

2. Пресметка на напониј U_z и најголеміије поштенцијални разлики $E_{d,max}$ за секоја од разгледуванијте конфигурации заземјувачи.

За секоја од разгледуваните 5 конфигурации заземјувачи ќе ги пресметаме, најнапред напонот на заземјувачот $U_z = R_z \cdot I_z$, а потоа и вредноста на најголемата потенцијална разлика на допир $E_{d,max} = (E_{d,max} \% / 100) \cdot U_z$. На тој начин ја добиваме следната табела.

Табела В8. Резултати од пресметките на разгледуваните мрежести заземјувачи

Конфигурација	L_Σ (m)	R_z (Ω)	U_z (V)	$E_{d,max}$ (V)	$E_{c,max}$ (V)	$E_{d,doz} > E_{d,max}$
Конфигурација K1	200					не
Конфигурација K2	240					не
Конфигурација K3	300					не
Конфигурација K4	340					не
Конфигурација K5	380	0.643	772	255	58	не
Конфигурација K6	440	0.618				да

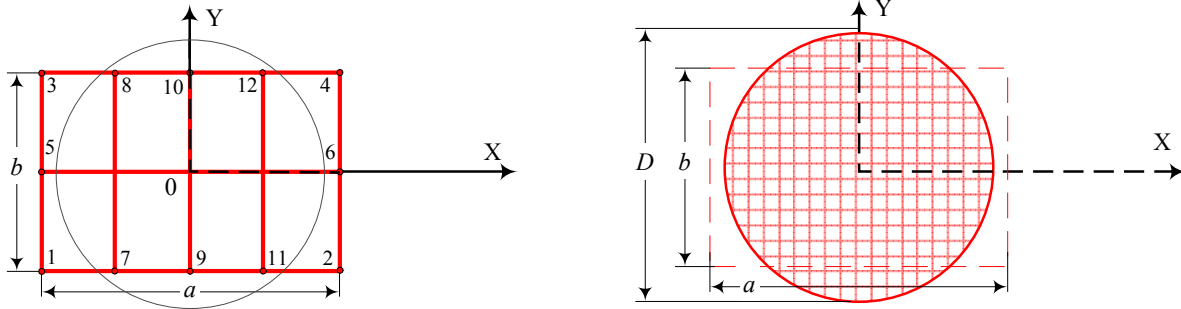
3. Избор на конфигурација на заземјувачој

Ја избираме најевтината конфигурација која ги задоволува техничките критериуми за безопасност, а тоа е конфигурацијата K_6 бидејќи од сите технички прифатливи варијанти нејзината цена (односно вкупна должина L_Σ на елементите на заземјувачот) е најмала.

9. Вежба. Работи со програмата "ZAZEM". (file = "ZAZEM-MrezZaz.xls")

Цел на вежбата: Еквивалентирање на мрежест заземјувач со кружна плоча

Мрежест заземјувач со димензии $a \times b = 60 \times 40$ m и геометрија идентична со заземјувачот од конфигурацијата К5 во вежбата В6 во услови на земјоспој одведува струја во земјата $I_z = 1,2$ kA. Специфичната отпорност на тлото изнесува $\rho = 60 \Omega\text{m}$. Со помош на програмата "ZAZEM" да се пресмета распределбата на потенцијалите по површината на земјата по должината на X-оската $\varphi(x)$. Резултатите од пресметките да се споредат со резултатите што ги дава формулата (В9.1) која што се однесува на промената $\varphi(x)$ во случајот кога мрежестиот заземјувач е заменет со еквивалентна кружна плоча со плоштина еднаква на плоштината на мрежестиот заземјувач. резултатите да се прикажат графички.



Слика В9.1. Еквивалентирање на мрежест заземјувач со кружна плоча

Плоштината A што ја зафаќа мрежестиот заземјувач изнесува:

$$A = a \times b = 2400 \text{ m}^2.$$

Еквивалентниот пречник на кружната плоча со иста плоштина ќе биде:

$$D = \sqrt{4 \cdot A / \pi} = 1,128 \cdot \sqrt{A} = 55,28 \text{ m}.$$

Отпорноста на распространување на заземјувач во облик на кружна плоча со пречник D изнесува:

$$R_z = \frac{\rho}{2 \cdot D} = \frac{60}{2 \cdot 55,28} = 0,543 \Omega.$$

Напонот U_z на заземјувачот при струја на одведување $I_z = 1,2$ kA ќе биде:

$$U_z = R_z \cdot I_z = 0,543 \cdot 1200 = 651 \text{ V}.$$

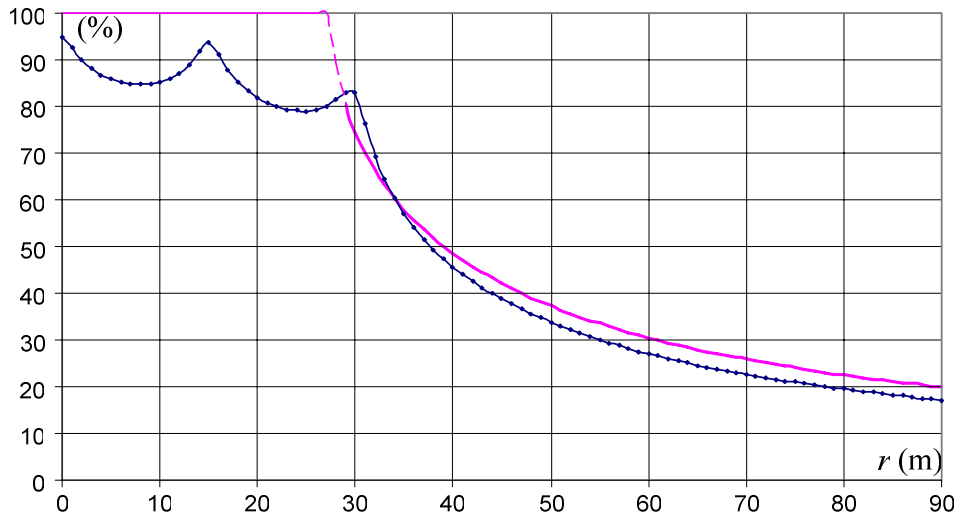
Потенцијалот $\varphi(x)$ во точка на површината од земјата на растојание x од центарот на кружната плоча, според [2], ќе биде:

$$\varphi(x) = \frac{2}{\pi} \cdot \frac{\rho \cdot I_z}{2 \cdot D} \cdot \arcsin \frac{D}{2x} = \frac{2}{\pi} \cdot U_z \cdot \arcsin \frac{D}{2x}; \quad x > \frac{D}{2}; \quad \varphi(x) = U_z \text{ за } x \leq \frac{D}{2}. \quad (\text{B9.1})$$

Врз основа на релацијата (В9.1) е добиена зависноста $\varphi(x)$; $x \geq 28$ m. Резултатите од пресметките се прикажани во втората и третата редица од табелата В9. Во четвртата и петтата редица од истата табела се прикажани и пресметаните вредности на потенцијалите $\varphi(x)$ за мрежестиот заземјувач од конфигурацијата К5 со помош на програмата "ZAZEM". Обата резултата се прикажани во табелата Б.9.2 и графички на сликата В9.2.

Табела В9. Резултати $\varphi(x)$ во (V) и во (%) од пресметките на распределбата на потенцијалите

R_z (Ω)	$\varphi(x)$	28 m	29 m	30 m	31 m	32 m	33 m	34 m	35 m	40 m	45 m	50 m	60 m	70 m	80 m	90 m
0,543	(V)	585	524	486	456	432	412	394	377	316	274	243	198	168	146	129
	(%)	89.8	80.4	74.6	70.1	66.4	63.2	60.4	58.0	48.6	42.1	37.3	30.5	25.8	22.5	19.9
0,643	(V)	627	642	641	589	536	496	465	439	353	299	261	209	175	150	132
	(%)	81.3	83.1	83.0	76.3	69.4	64.3	60.2	56.9	45.7	38.7	33.8	27.0	22.6	19.5	17.1



Слика В9.2. Распределба на потенцијалите (%) долж X-оската $\varphi(x)$

Од облиците на кривите $\varphi\%(x)$, прикажани на дијаграмот од сликата В9.2, гледаме дека надвор од областа опфатена со мрежестиот заземјувач тие прилично добро се совпаѓаат што значи дека симулацијата на мрежестиот заземјувач со соодветна "еквивалентна" кружна плоча е прилично успешна. Колку е димензијата на мрежестиот заземјувач поголема толку е таа еквиваленција пореална – и обратно. Од тука произлегува заклучокот дека влијанието на големите мрежести заземјувачи во околниот простор може успешно да се проценува со помош на моделот на масивна кружна плоча.

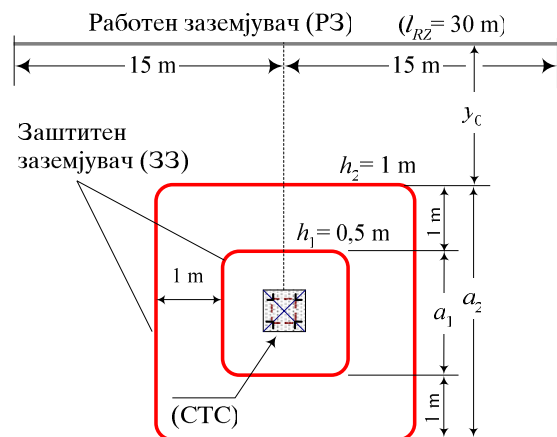
Разликата помеѓу вредностите за отпорноста на распространување R_Z на заземјувачот добиена со формулата (В9.1) ($R_Z = 0,543 \Omega$) и со програмата "ZAZEM" ($R_Z = 0,643 \Omega$) од околу 18% се должи на фактот што мрежестиот заземјувач сепак не претставува масивна правоаголна плоча и затоа тој ќе има поголема отпорност и покрај тоа што и обата заземјувача имаат иста плоштина A .

10. Вежба. Работа со програмот "SPREGNATI_ZAZEMJUVACI". (file = "IZVOZ_NA_POT.xls").

Цел на вежбата: Анализа на изнесениот потенцијал од заштитен на работен заземјувач.

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 страна $a_1 = 3$ m и е закопан на длабочина $h_1 = 0,5$ m, додека вториот е со димензија $a_2 = 5$ m и е закопан на длабочина $h_2 = 1$ m (слика В10.1).

Работниот заземјувач (РЗ) од СТС е изведен, исто така, од поцинкувана челична лента FeZn 30×4 ($d = 22$ mm) со должина $l_{RZ} = 30$ m, закопана на длабочина $h_{RZ} = 0,8$ m. Обата заземјувача се поставени во хомогено тло со специфична отпорност $\rho = 300 \Omega\text{m}$. Струјата I_Z што се одведува во земјата од заштитниот заземјувач во услови на земјоспој изнесува $I_Z = 40$ A.

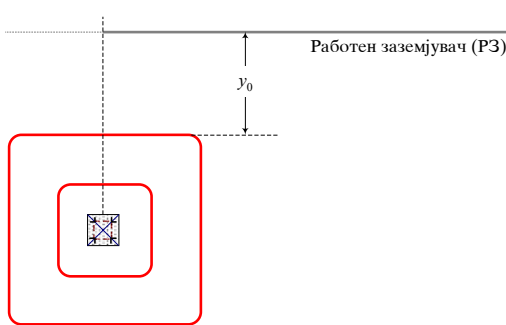


Слика В10.1. Изнесување на потенцијалот од заштитен на работен заземјувач

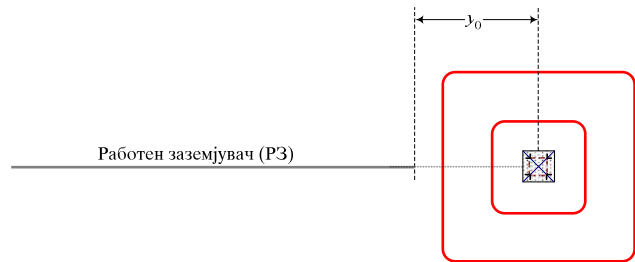
Со помош на програмата "SPREGNATI_ZAZEMJUVACI" да се определи зависноста $U_{RZ}(y_0)$ на големината извезениот потенцијал во (V) и во (%) од ЗЗ на РЗ од растојанието y_0 за вредности на y_0 : 5, 10, 15, 20 и 25 m. Од таа зависност да се процени колкаво треба да биде растојанието $y_{0.min}$ ако сакаме во случајов извезениот потенцијал да не ја надмине вредноста 40%. Резултатите од пресметките да се сместат во табелата В9. Анализите да се повторат и за случаите кога позицијата на РЗ во однос на ЗЗ е како на сликите В10.2 и В10.3.

Табела В10. Резултати од пресметките на разгледуваните мрежести заземјувачи

Распоред	Изнесен поинтензијал	$y_0 = 5$ m	$y_0 = 10$ m	$y_0 = 15$ m	$y_0 = 20$ m	$y_0 = 25$ m	$y_{0.min}$ (m)
Според слика В10.1	U_{RZ} (V)						
	U_{RZ} (%)						
Според слика В10.2	U_{RZ} (V)						
	U_{RZ} (%)						
Според слика В10.3	U_{RZ} (V)						
	U_{RZ} (%)						



Слика В10.2. Извоз на потенцијалот – распоред 2



Слика В10.3. Извоз на потенцијалот – распоред 3

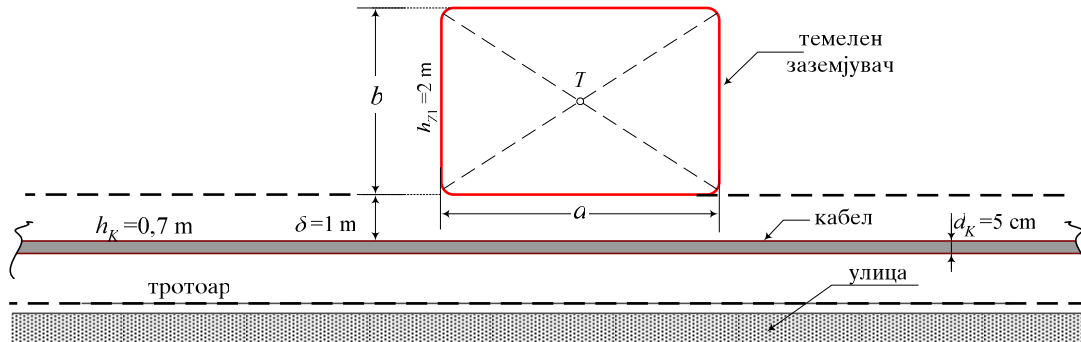
11. Вежба. Работа со програмот "SPREGNATI_ZAZEMJUVACI". (file = "IZVOZ_NA_POT.xls").

Цел на вежбата: Испишување на карактеристиките на мрежестите заземјувачи.

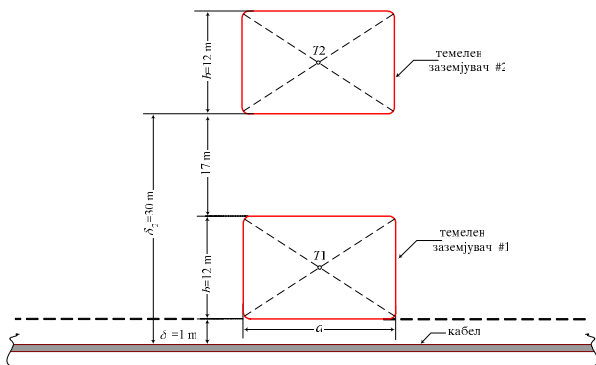
Се посматра темелен заземјувач на зграда во форма на правоаголник со страници $a=14$ m и $b=12$ m, како на сликата В11.1. Заземјувачот е закопан на длабочина $h_z = 2$ m. Покрај самата зграда, паралелно со неа, на растојание $\delta_1 = 1$ m од заземјувачот, минува кабел со спроводен надворешен плашт и пречник $d_k = 5$ cm, закопан на длабочина $h_k = 0,7$ m. Специфичната отпорност на тлото изнесува $\rho = 100$ Ω m. Кабелот работи во режим на земјоспој и притоа неговиот потенцијал изнесува $U_k = 1200$ V. Потребно е да се определи следното.

- Со помош на програмата "SPREGNATI_ZAZEMJUVACI.xls" да се пресмета извезениот потенцијал U_{z1} на темелниот заземјувач. Колкав е потенцијалот во тежиштето на темелниот заземјувач φ_{T1} ? Тежиштето T1 ги има следните координати: $x_{T1} = 0$ m; $y_{T1} = \delta + b/2 = 7$ m; $z_{T1} = 0$, т.е. T1(0, 7, 0).
- Да се определат потенцијалите U_{z2} и φ_{T2} во објектот кој што се наоѓа зад првиот станбен објект на растојание $\delta_2 = 30$ m и има ист габарит, односно димензии, како и претходниот (слика В11.2).
- Колкав ќе биде потенцијалот U_z на заземјувачите од обата објекта ако се изврши нивно галванско поцрзување, како што е тоа прикажано на сликата В.11.3.

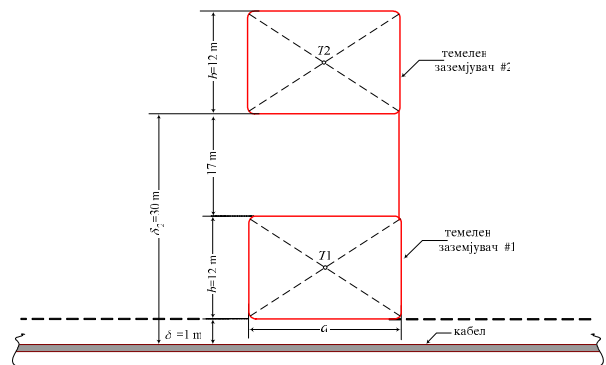
Напомена. Кабелот да се моделира со два хоризонтални заземјувача со пречник $d_K=50$ mm и со должини од по 200 m, закопани на истата длабочина $h_K=0,7$ m и поставени централно во однос на самиот објект, така што позицијата на првиот кабел е опишана со точките $M1(-200, 0, -0,7)$ и $M2(0, 0, -0,7)$ додека позицијата на вториот кабел е опишана со точките $M2(0, 0, -0,7)$ и $M3(200, 0, -0,7)$.



Слика В11.1. Изнесување на потенцијалот во станбен објект преку кондуктивна спрега



Слика В11.2. Изнесување на потенцијалот во станбени објекти преку кондуктивна спрега



Слика В11.3. Изнесување на потенцијалот во група станбени објекти преку кондуктивна спрега

12. Вежба. Работа со програмот "SPREGNATI_ZAZEMJUVACI". (file = "IZVOZ_OGRADA.xls").

Се посматра случајот од задачата 4.8 во кој што се извезува потенцијал од заштитниот заземјувач (ZZ) на металната ограда од постројката. Заштитниот заземјувач, којшто е изведен од бакарно јаже $Cu50$ mm² ($d_Z = 9$ mm), закопан на длабочина $h_Z = 1,0$ m, може да се прикаже упростоено, со само 7 сегменти, како што е тоа прикажано на сликата В12.1. Заземјувачот на оградата е изведен од поцинкувана челична лента со димензии FeZn 30x4 mm², ($d_{ek}=22$ mm) закопана на длабочина $h_o = 0,5$ m (слика В12.1). Одделните точки од заштитниот заземјувач (Z) и од заземјувачот на оградата (M) ги имаат следните координати:

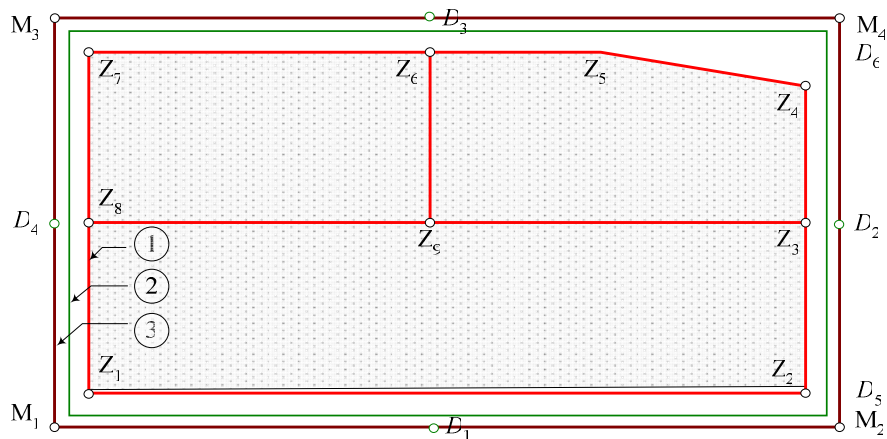
точка	Z ₁	Z ₂	Z ₃	Z ₄	Z ₅	Z ₆	Z ₇	Z ₈	Z ₉	M ₁	M ₂	M ₃	M ₄
x (m)	0,0	44,0	44,0	44,0	32,0	22,0	0,0	0,0	22,0	-4,0	48,0	-4,0	48,0
y (m)	0,0	0,0	28,0	48,0	62,0	62,0	62,0	28,0	28,0	-4,0	-4,0	68,0	68,0
z (m)	-1,0	-1,0	-1,0	-1,0	-1,0	-1,0	-1,0	-1,0	-1,0	-0,5	-0,5	-0,5	-0,5

Да се илустрира:

- а) отпорноста на распространување R_Z како и потенцијалот U_Z што ќе го добие заштитниот заземјувач во услови на земјоспој во постројката ако што струјата на одведување од заземјувачот во земјата изнесува $I_Z = 20$ A.

- б) изнесениот потенцијал U_0 на заземјувачот од оградата, односно оградата, во V и во %;
 в) потенцијалната разлика на допир во точките од површината на земјата:
 $D_1(22, -4, 0)$; $D_2(48, 31, 0)$; $D_3(22, 68, 0)$, $D_4(-4, 31, 0)$, $D_5(48, -3, 0)$ и $D_6(48, 67, 0)$ кој што би се остварил кога човек кој што се наоѓа од надворешната страна на оградата, на растојание 1 m од неа, ќе ја допре во услови на постоење на земјоспој.

Осцилации и податоци: Спец. отпорност на тлото: $\rho = 100 \Omega\text{m}$; струја на одведување: $I_z = 20 \text{ A}$.



Слика В12. Изнесување на потенцијалот преку кондуктивна спрега
 Леџенда: 1) Заштитен заземјувач; 2) Ограда; 3) Заземјувач на оградата

Резултатите од пресметките да се сместат во следната табела.

Табела В12.1. Резултати од пресметките на изнесениот потенцијал на оградата

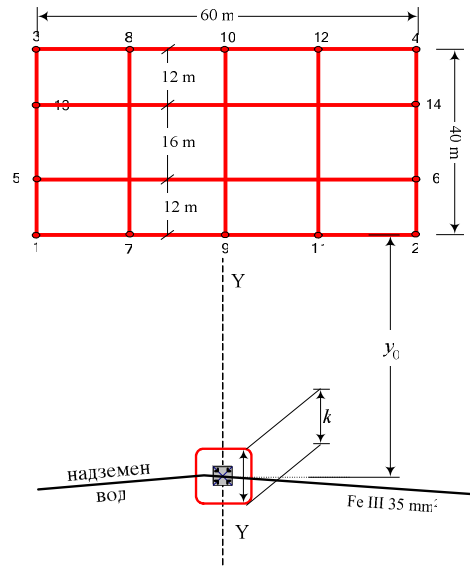
R_z		(Ω)	φ_{D1}		(V)
U_z		(V)	φ_{D2}		(V)
$U_z \%$		(%)	φ_{D3}		(V)
U_0		(V)	φ_{D4}		(V)
$U_0 \%$		(%)	φ_{D5}		(V)
/			φ_{D6}		(V)

13. Вежба. Работа со програмот "SPREGNATI_ZAZEMJUVACI".

Мрежест заземјувач со димензии 60×40 m и геометрија идентична со заземјувачот од конфигурацијата К6 во вежбата В7 во услови на земјоспој одведува струја во земјата $I_z = 4$ kA. Специфичната отпорност на тлото изнесува $\rho = 60 \Omega\text{m}$.

Во близина на самиот заземјувач минува 35 kV надземен вод. Заземјувачите од столбовите на надземниот вод се во форма на квадрат со страница $k = 3$ m, закопани на длабочина $h = 0,8$ m. Водот е изведен со заштитно јаже Fe III 35 mm^2 . Столбот бр. 15 од водот минува на растојание $y_0 = 20$ m од заземјувачот, како што е прикажано на сликата В.13.1.

Со помош на програмата "SPREGNATI_ZAZEMJUVACI" да се пресмета колкав ќе биде изнесениот потенцијал на столбот бр. 15 $U_{15} = ?$ Потоа да се прикаже зависноста $\varphi(y)$ по должината на правецот Y – Y и да се оцени големината на напоните на допир и чекор во околината на столбното место бр. 15. Резултатите од пресметките да се прикажат во табела и да се скицираат на дијаграм.



Слика В13.1. Изнесување на потенцијалот во близина на надземен вод

*) *Забелешка.* Бидејќи заземјувачот на столбот е галвански поврзан со заштитното јаже, тој всушност ќе биде дел од еден друг, надворешен, заземјувачки систем. Еквивалентата импеданција на тој надворешен заземјувачки систем претставува паралелна врска од влезните импеданции на заштитното јаже, гледано кон лево и кон десно од посматраниот столб бр. 15. Со мерење е утврдено дека таа изнесува $\underline{Z}_e = (1,8 + j0) \Omega$.