



УНИВЕРЗИТЕТ „СВ. КИРИЛ И МЕТОДИЈ“ – СКОПЈЕ
ФАКУЛТЕТ ЗА ЕЛЕКТРОТЕХНИКА
И ИНФОРМАЦИСКИ ТЕХНОЛОГИИ



РИСТО К. АЧКОВСКИ

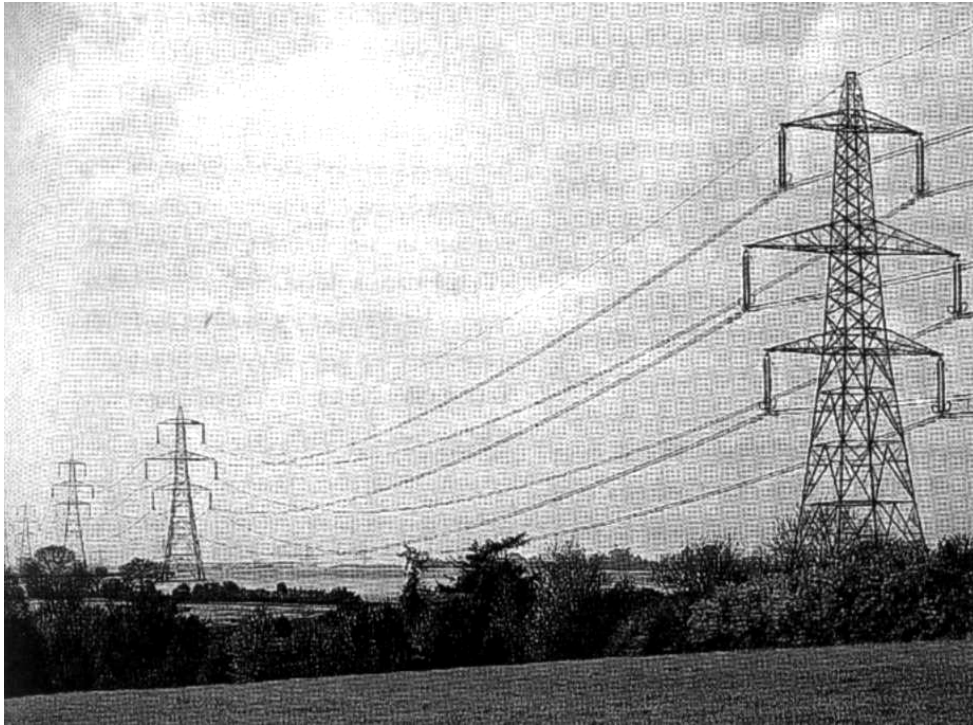
НАДЗЕМНИ И КАБЕЛСКИ ВОДОВИ

(ПРЕДАВАЊА)

СКОПЈЕ, 2015 ГОДИНА

1. ОПШТО ЗА НАДЗЕМНИТЕ ВОДОВИ

Електроенергетските водови се основни елементи од електроенергетскиот систем, наменети за пренос и распределба на електричната енергија. Тие се изведуваат во две различни форми – како *надземни водови (далекуводи)* и како подземни (*кабелски*) водови, односно *кабли*.

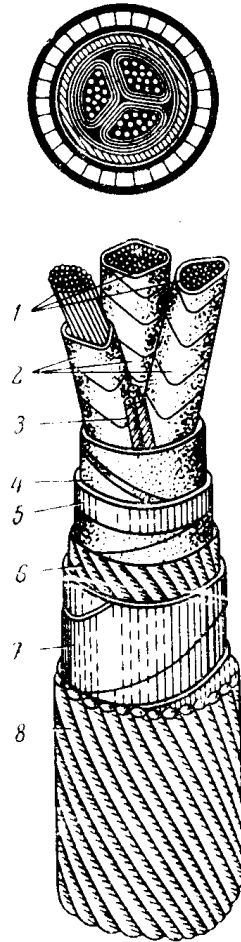


Слика 1.1.а Изглед на 400 kV надземен вод (далекувод)

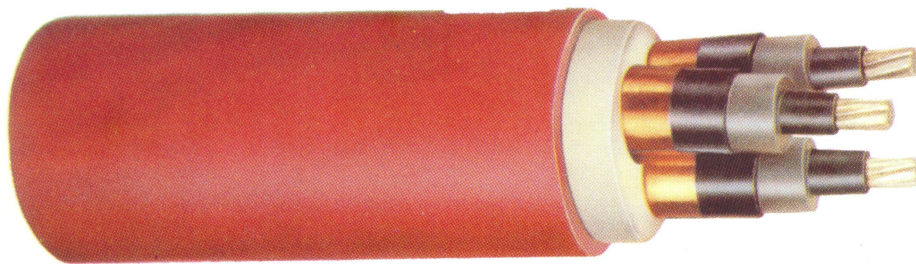
Кога електричните спроводници од водот се голи (неизолирани) и се држат над земјата, прицврстени преку електричните изолатори на соодветни носечки конструкции (слика 1.1), тогаш зборуваме за надземни водови (далекуводи). Ако, пак, спроводниците се изолирани, заштитени на специјален начин и наменети за полагање во земја, тогаш станува збор за кабелски водови, или скратено кабли.

Каблите се технички и економски оправдани само во поголемите агломерации на комзумот, главно во индустриските и градските дистрибутивни мрежи. Тие се за неколу пати, а понекогаш и за повеќе од десетина пати поскапи од надземните водови (НВ) со исти преносни способности. Затоа, каблите се применуваат само тогаш, кога за тоа постојат оправдани *технички причини* (на пример поврзување на острови, премин преку големи реки и други широки пространства и др.), или пак кога постојат оправдани *урбанистички причини* (градски подрачја, близина на аеродром, естетски изглед итн.).

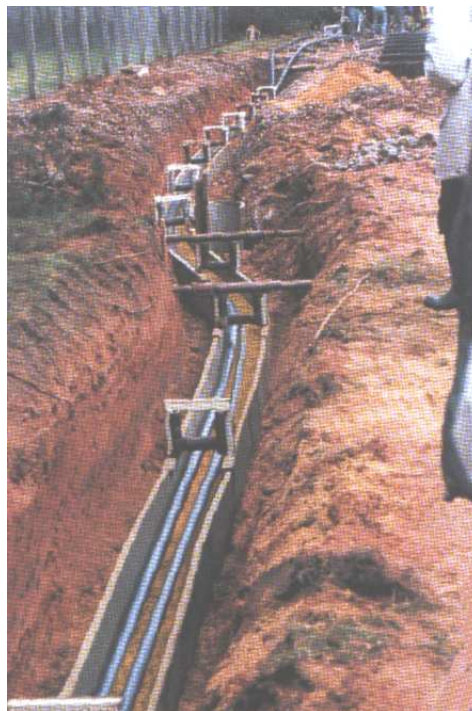
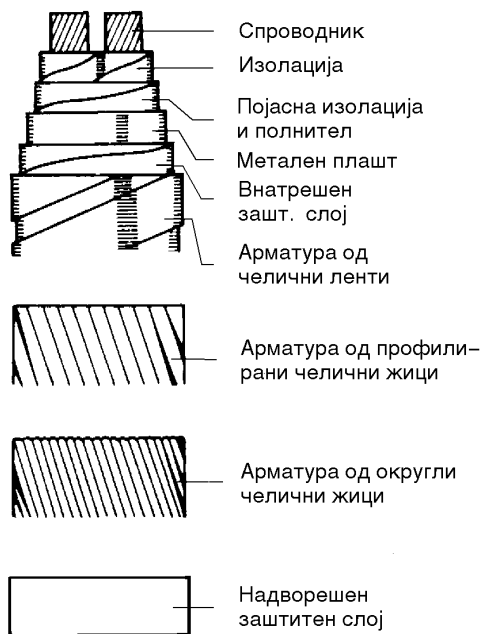
Од тие причини денес, во современите преносни системи, кои се обично распределени на големи географски пространства, *преовладуваат трифазните надземни водови*. Само во некои специјални случаи (кои во иднина ќе бидат сè почести), изборот на каблите ќе може да биде условен од чисто економски причини (*високо* обештетување за откуп и користење на земјиштето долж трасата од водот, или пак примена на специјални кабли со екстремно високи преносни моќности).



**Слика 1.1.б Класичен трижилен кабел за номинален напон 10 kV
тип IPO 13, со изолација од импрегнирана хартија**

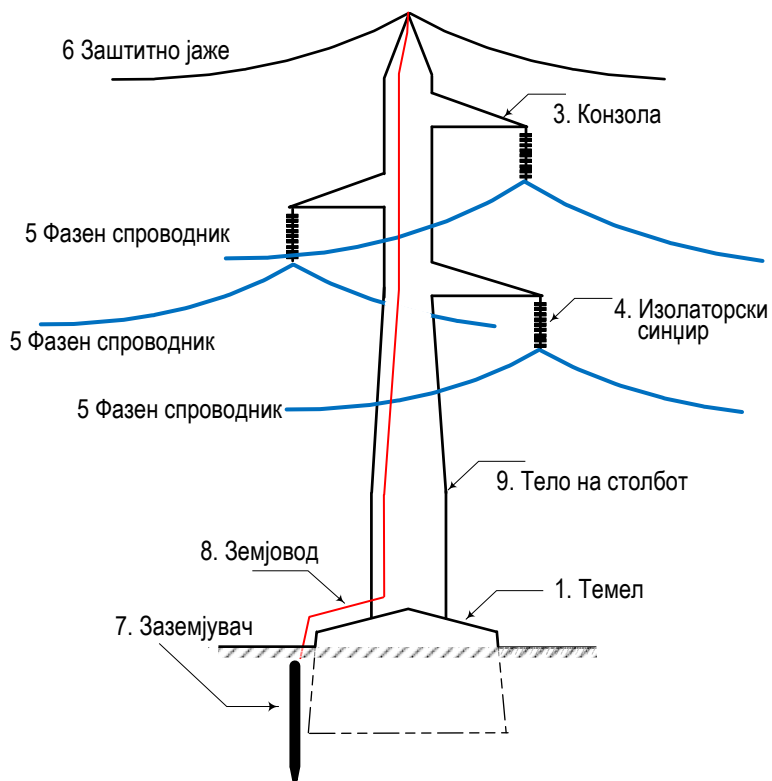


**Слика 1.1.в Современ трижилен кабел за номинален напон 10 kV
со изолација од вмрежен полиетилен (XLPE)**



Слика 1.1.г Конструкција на трижилен кабел (лево) и кабелски вод поставен во земјен ров (десно)

1.1 ЕЛЕМЕНТИ НА НАДЗЕМНИТЕ ВОДОВИ

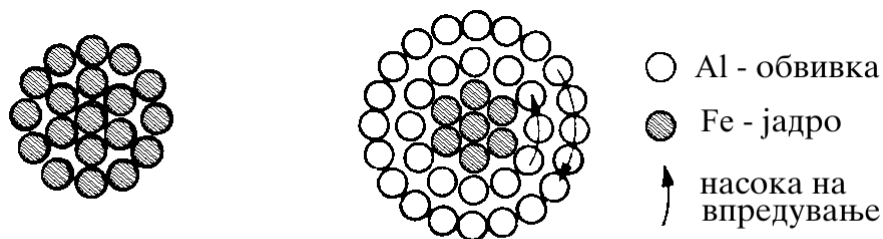


Слика 1.2 Составни делови на надземен вод

Основни елементи од кои се состои еден надземен вод (слика 1.2) се:

- 1 – темел;
- 2 – столб;
- 3 – конзола;
- 4 – изолатор (изолаторски синџир или верига);
- 5 – спроводници;
- 6 – заштитно или громобранско јаже (јажиња);
- 7 – заземјувач;
- 8 – доземен спроводник (земјовод);
- 9 – тело на столбот;
- 10 – споен прибор, обесувачки (овесен) и заштитен прибор.

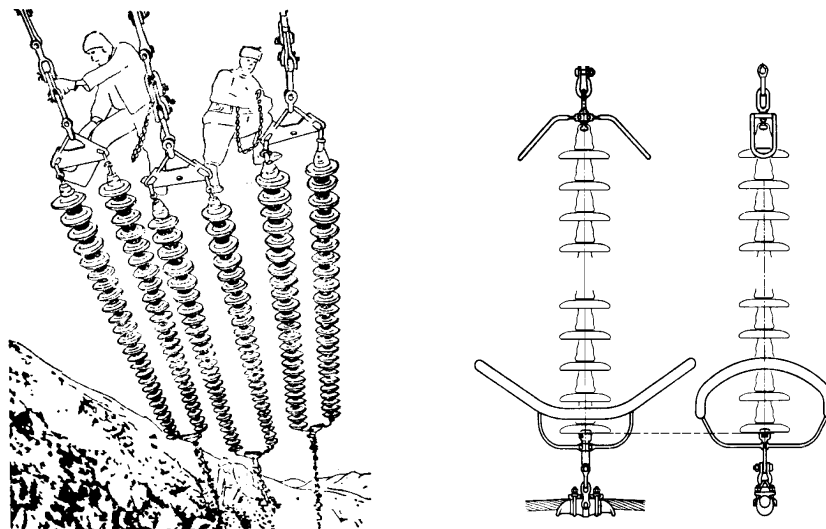
Спроводниците, како основен елемент на надземните водови имаат задача да ја спроведуваат (пренесуваат) електричната струја и тие се единствен активен дел од водот. Оптоварени се механички (на затегање) и термички.



Хомогено јаже б) Комбинирано Al/Fe јаже

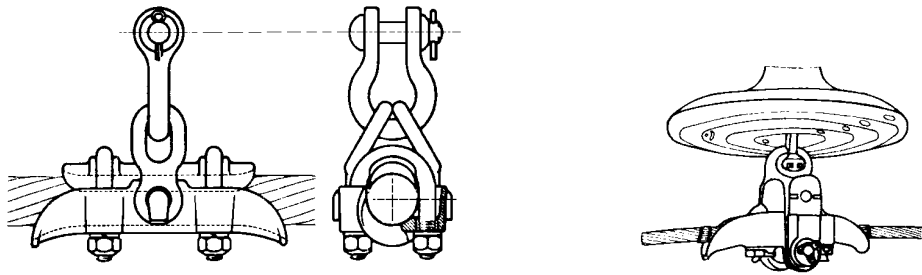
Слика 1.3 Напречен пресек на спроводници во форма на јаже

Изолаторите имаат двојна улога: електрички да ги изолираат спроводниците од столбот и механички да ги држат прицврстени за него, во определена положба. Тие се оптоварени електрички и механички, а при појава на електричен лак, уште и термички.



Слика 1.4 Изолаторски синџири (вериги) кај високонапонски надземен вод

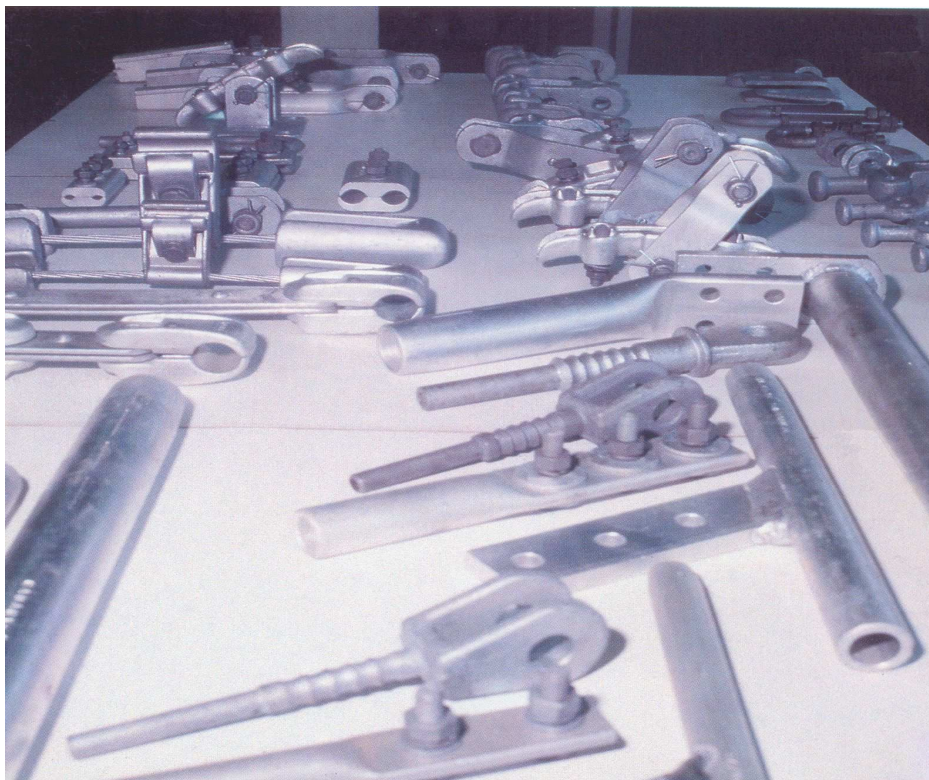
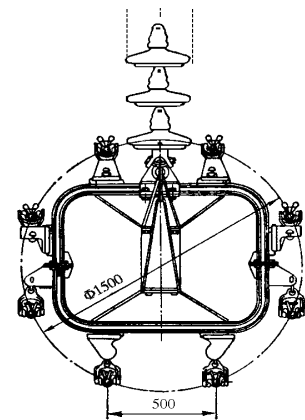
Обесувачкиот (овесниот) материјал и прибор механички ги сврзува спроводниците и изолаторите за столбот (сл. 1.5). Тој е оптоварен само механички.



Слика 1.5 Прицврстување на спроводникот за изолаторот со помош на носечка стегалка

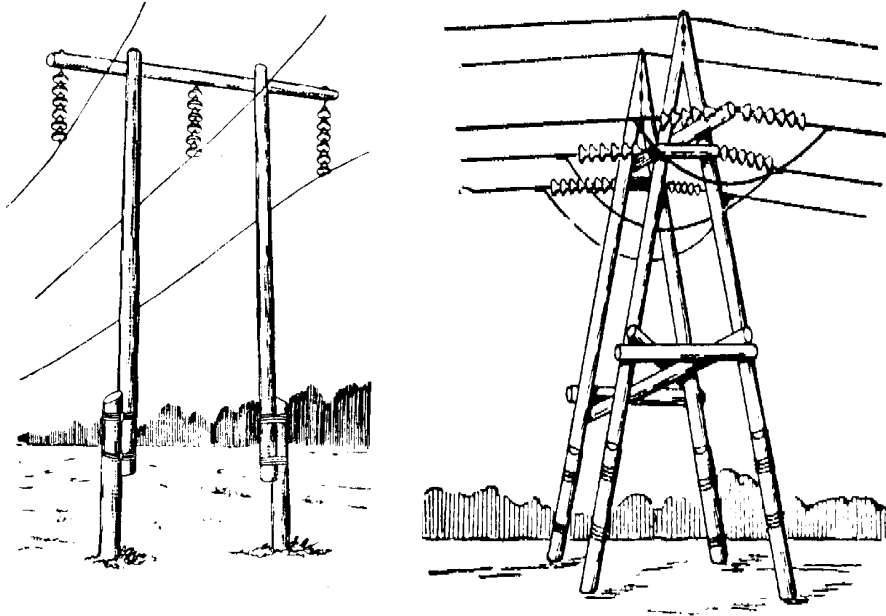
Заштитниот материјал и прибор врши разни заштитни функции како што е заштитата на спроводниците од вибрации, отстранување на настанатиот електричен лак од спроводниците и изолаторите, измена на обликот на електричното поле околу изолаторските синџири (т.н. регулација на полето) и друго.

Спојниот материјал и прибор осигурува континуирано минување на струјата таму каде што се врши спојување и продолжување на спроводниците, и тој е оптоварен термички, а често и механички.



Слика 1.6 Разни видови споен и заштитен прибор (арматура)

Столбовите имаат задача да обезбедат определена височина на спроводниците над тлото, но и да обезбедат определена взаемна положба на спроводниците во просторот. Тие се оптоварени механички. Темелите пак обезбедуваат статичка стабилност на целиот објект и силите што делуваат на столбовите ги пренесуваат на тлото.



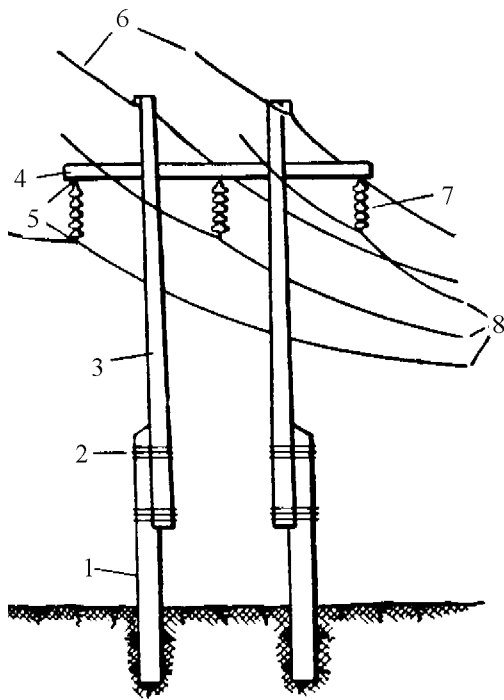
Слика 1.7 Дрвени столбови за 110 kV надземен вод

Заземјувањето на столбовите осигурува деловите од водот што нормално не се под напон да не добијат недозволено висок потенцијал при појава на атмосферски празнења или пак при појава на куси врски односно земни споеви на водот. Истовремено, заземјувањето ја штити и околината на водот од опасни напони што можат да бидат извор на штети и несреќи за луѓето и останатите живи суштества кои можат да дојдат во непосредна близина на надземниот вод.

Заштитното јаже (јажиња, кога ги има две) се нарекува уште и громобранско јаже. Тоа се поставува над фазните спроводници, на врвот од столбот и, по правило, е заземјено кај секој столб. Има основна задача да ги штити фазните спроводници од директни атмосферски празнења. Тоа исто така електрички ги сврзува заземјувачите на сите столбови од водот и при појава на куси врски со земја ја распределува струјата на кусата врска по околните столбови, па на тој начин ја смалува опасноста од штети и несреќи (опасни напони на чекор и допир) во близина на местото на кусата врска. Затоа, заштитното јаже во исто време претставува и составен дел од заштитниот систем на заземјување на водот.

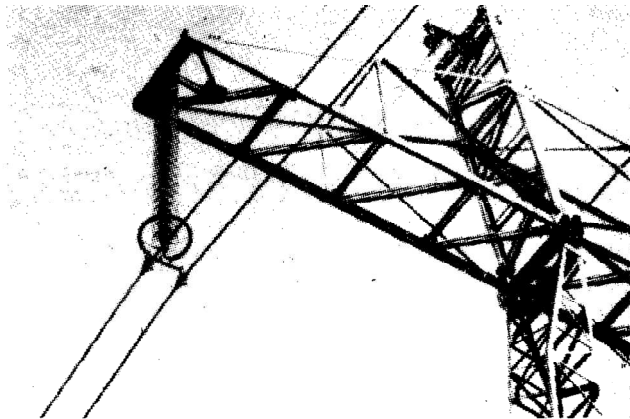
Бидејќи во нормални услови низ заштитното јаже **не тече струја**, тоа најчесто се изработува од **челик** заради ниската цена и големата механичка цврстина.

Елементите од надземните водови се изложени на **електрички**, **механички** и **термички напрегања**. Тие се изложени уште и на **корозија**. Затоа, тие мораат да бидат соодветно заштитени и од корозијата.



- 1) Ногара на столбот
- 2) Бандаж (челична жица)
- 3) Јарбол
- 4) Пречка (портал)
- 5) Арматура за прицврстување на спроводниците и изолатор
- 6) Заштитно (гromобр.) јаже
- 7) Изолаторски синџир
- 8) Фазни спроводници

Слика 1.8 Електричен столб од надземен вод изработен од дрво



Слика 1.9 Изглед на 380 kV носечки (висечки) изолаторски синџир, закачен за челична конзола. Носи сноп од два спроводника

2. ЕЛЕКТРИЧНИ СПРОВОДНИЦИ

2.1 МАТЕРИЈАЛИ ЗА СПРОВОДНИЦИТЕ И ЗАШТИТНИТЕ ЈАЖИЊА

За изработка на електричните спроводници од далекуводите се користат разни материјали. Од нив се бара да имаат добра **електрична спроводност**, голема **механичка цврстина**, можност за **лесна обработка**, да бидат **отпорни** на оштетувања, стареење, корозија и друго, но во исто време да имаат и прифатлива **цена**.

Сите наведени својства не можат да се најдат кај еден единствен материјал, па затоа најчесто се прибегнува кон изработка на спроводници кои претставуваат **комбинација на два различни метала** (двометални и комбинирани спроводници односно јажиња).

Основни материјали од кои се изработуваат спроводниците кај надземните водови се **бакарот** и **алуминиумот**, но се користат и некои нивни **легури** како што е на пр. **бронзата**, легурата **алдреј** и други. Заштитните јажиња најчесто се изработуваат од **челик**.

Основните физички и механички карактеристики на споменатите материјали се прикажани во табелата 2.1.

Табела 2.1 Физички и механички показатели на материјалите за изработка на спроводници и заштитни јажиња кај надземните водови

Материјал	Специфична електрична спроводност	Специфична маса	Модул на еластичност	Температурен коефициент	Јакост на кинење
	$S \cdot m/mm^2$	gr/cm^3	daN/mm^2	$1/^\circ C$	daN/mm^2
Бакар	56,0	8,9	13.000	$17 + 10^{-6}$	39,0
Алуминиум	34,8	2,7	6.300	$23 \div 10^{-6}$	15,0
Челик	7 – 8	7,8	20.000	$11 + 10^{-6}$	120,0
Бронза	20 ÷ 50	8,3 ÷ 8,9	8.000 ÷ 9.000	$17 + 10^{-6}$	31 ÷ 135
Алдреј	30,0	2,7	6.300	$23 \div 10^{-6}$	32 ÷ 37

Бакар. За изработка на спроводниците се употребува чист **електролитички бакар**. Јакоста на кинење на бакарната жица зависи во голема мера од начинот на нејзината обработка. За зголемување на јакоста на кинење, најнапред се врши **топло влечење**, а потоа и **ладно влечење** на бакарните жици. Со нивно **впредување**, се добиваат **бакарни јажиња**.

Бакарните спроводници се **отпорни на хемиските влијанија** на околната средина. Бакарот во атмосфера на кислород оксидира, т.е. неговата површина се покрива со **бакарен оксид**, кој понатаму претставува заштитна антикорозивна покривка на спроводникот. Спроводниците од бакар интензивно оксидираат кога во воздухот се присутни **соединенија на сулфур**. Затоа, во индустриските области кадешто постојат хемиски фабрики кои во атмосферата испуштаат гасови што содржат сулфур е потребно да се преземаат специјални мерки за заштита на бакарните спроводници од корозија.

Според прописите, употребата на спроводници од бакар за градба на нови високонапонски ($U_n > 1 \text{ kV}$) водови од економски и стратешки причини е забранета. Затоа, основен материјал за изработка на спроводниците за далекуводите е алуминиумот.

Алуминиум. За производство на спроводници за надземните водови најчесто се употребува алуминиумот, добиен по **електролитички** пат. Сосема мали **примеси** во алуминиумот, дури до 1%, значително ги влошуваат неговите електромеханички показатели.

Жиците од алуминиум, наменети за производство на спроводници се обработуваат на сличен начин како и бакарните жици. И алуминиумот кородира по својата површина во присуство на кислород а самиот **оксиден слој**, како и кај бакарот, понатаму врши антикорозивна заштита на спроводникот. Алуминиумот интензивно кородира во присуство на **солната (хлороводородната) киселина**. Употребата на спроводници од алуминиум кај надземните водови треба да се избегнува кога водот минува покрај **морски брег**, или пак минува низ област во која постојат фабрики што испуштаат во атмосферата соединенија на **натриум** и **калиум**.

Бронза. Бронзата што се употребува за електричните спроводници претставува **легура на бакар и калај**, во која, за да се зголеми нејзината механичка јакост, се додаваат мали количества **фосфор** и **силициум**. Електромеханичките показатели на бронзата битно зависат од **составот на легурата**. Со зголемувањето на процентот на фосфорот, силициумот и калајот, се подобруваат механичките карактеристики на легурата, но истовремено со тоа се намалува нејзината електрична спроводност - и обратно.

Алдреј (AlMgSiE). Алдрејот претставува **легура на алуминиумот** во која се содржани мали количества на **железо** Fe (0,3%), **магнезиум** Mg (0,3% - 0,5%) и **силициум** Si (0,4% - 0,7%). Тој има добри механички својства и слично како и алуминиумот, отпорен е на корозија. Со зголемување на процентот на железото и магнезиумот во легурата, јакоста на затегање на легурата расте, но затоа ϵ се намалува нејзината електрична спроводност.

Алдрејот претставува **крта (нееластична)** легура и под дејство на механичките вибрации лесно се оштетува. Наоѓа примена за изработка на електрични спроводници во вид на **јажиња** (хомогени и комбинирани алдреј-челик јажиња) во Западна Европа. Кај нас тој сè уште не нашол своја примена.

Челик. Челикот има многу **лоши електрички**, но затоа има **одлични механички својства**. Поради големата магнетска пермеабилност (што доведува до изразена појава на скин-ефектот и појава на магнетско заситување), омскиот и индуктивниот отпор на челичните спроводници е нелинеарен и нагло се зголемува со зголемувањето на струјното оптоварување. Затоа, челикот се користи како материјал за изработка на фазните спроводници само во исклучителни ситуации (на пример за совладување на многу големи распони при премини преку реки, провалии и друго), но и тогаш, предност се дава на комбинираните Al/C јажиња, појачани со зголемен процент на челик во нивната конструкција.

Челичните спроводници најчесто се користат како **заштитни јажиња**, но и за таа цел, спроводниците со подобра електрична спроводност понекогаш имаат предност. Меѓутоа, добрите својства на челикот се користат кај комбинираните спроводници алуминиум-челик (Al/C) и алдреј-челик (AlMgSi/C). Челикот е **неотпорен на корозија**. Се штити со **поцинкување**, при што, обвивката од цинк треба да има трајност најмалку 15 години.

2.2 КОНСТРУКЦИЈА И НАЧИН НА ИЗВЕДБА НА СПРОВОДНИЦИТЕ

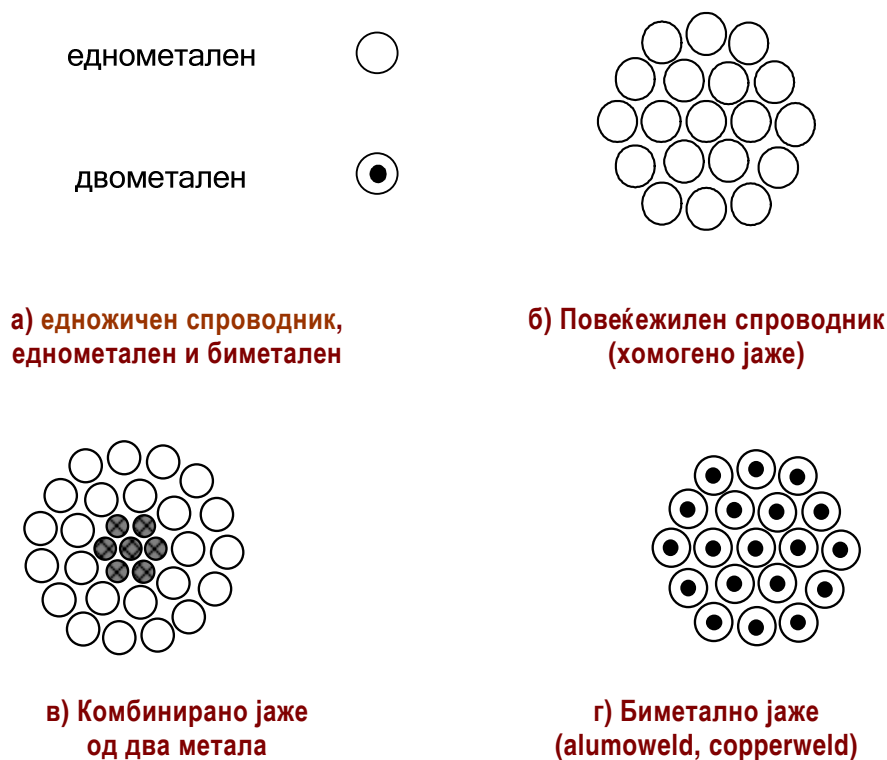
Според својата **конструкција**, спроводниците кај надземните водови се делат на:

- **едножични** спроводници и
- **повеќежични** спроводници, односно **јажиња**.

Во поглед на својот состав, спроводниците можат да бидат изработени од **еден** или од **два** различни **метала**.

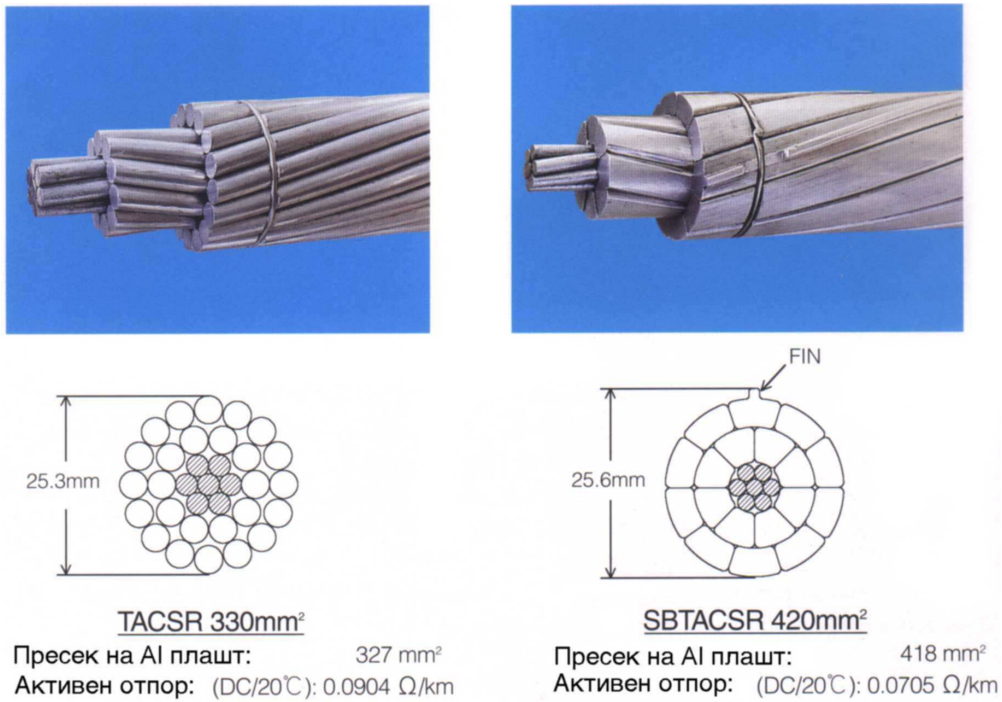
Јажињата чиито жици се изработени од еден метал се нарекуваат **хомогени** јажиња (слика 2.1), а оние чии жици се изработени од два метала – **комбинирани** и/или **биметални** јажиња. Кај **комбинираните** јажиња двата метала се поставени **независно** и се механички одделени еден од друг, додека пак кај биметалните спроводници (јажиња), секоја жичка се состои од два метала и притоа едниот метал е нанесен врз другиот по пат на електролиза¹.

Кај нас во 400 kV мрежи се користи јажето со жици од алумовелд (alumoweld) AWG 126,1 mm², како заштитно јаже кај водовите 400 kV.

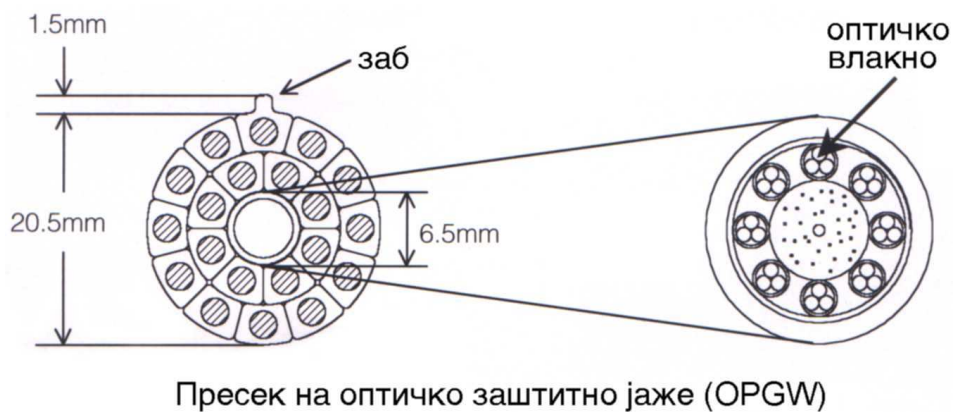
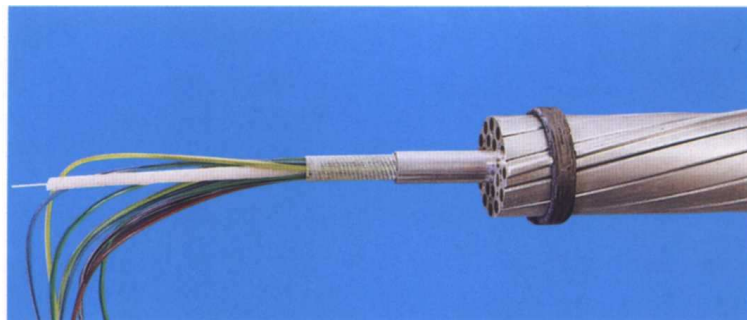


Слика 2.1. Конструкција на спроводниците (јажињата) за надземни водови и нивна поделба

¹ Во САД се применуваат челични жици, обложени со бакар (copperweld), коко и челични жици, обложени со алуминиум (alumoweld), плетени во форма на јаже.



Слика 2.1.ѓ Современи конструкции на спроводниците за надземни водови кои често се применуваат во Европа и САД



Слика 2.1.е Современа конструкција на заштитно јаже со вграден оптички кабел за надземен вод со висок и највисок напон

Едножичните спроводници (слика 2.1.а) се изработуваат обично со кружен напречен пресек. Се произведуваат со мали пресеци (до 16 mm²), бидејќи со зго-

лемувањето на нивниот пресек, им се намалува **совитливоста** и тоа ја отежнува нивната **монтажа**. **Деформациите** до кои може да дојде при монтажата на овие спроводници поради преголемото свиткување подоцна тешко можат да се отстранат, па таквиот спроводник ќе треба да биде заменет со нов.

Од тие причини, кај нас се употребуваат едножични спроводници само кај **нисконапонските** (НН) водови со мал пресек и за мали распони. Употребата на едножичните спроводници од **алуминиум** или **алдреј** е **забранета**, а се дозволува само употреба на **бакарни жици** со пресек до 16 mm^2 и тоа за распони до 80 m.

Повеќежичните спроводници се метални јажиња добиени со впредување (сукање) на повеќе жици. Се произведуваат како хомогени, комбинирани и биметални.

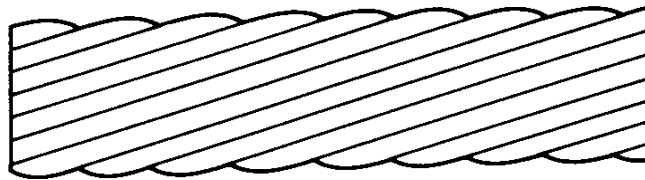
Јажињата претставуваат стандардна форма за изработка на спроводниците кај надземните водови. Тие се **совитливи** и тоа им е основната предност во однос на едножичните спроводници со ист пресек.

Јажето има **нормална изведба** кога сите негови жици се со ист пресек (сл. 2.1 б). Во тој случај, бројот на жици во секој слој е точно определен, а секој нареден слој има 6 жици повеќе од претходниот. Вкупниот број на жици N во едно хомогено јаже ќе биде:

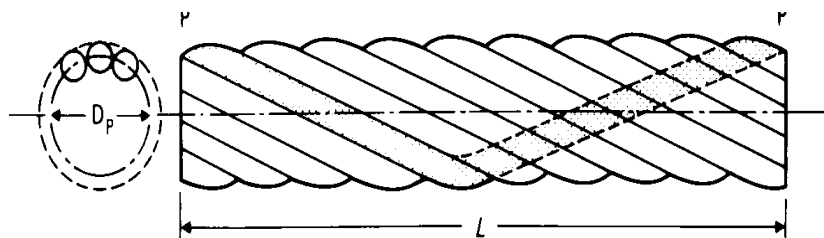
$$N=3 \cdot n^2-3 \cdot n+1, \quad (2.1)$$

при што, со n е означен бројот на слоеви, сметајќи ја и централната жица како еден слој. Оттука произлегува дека бројот на жици во јажето ќе биде:

$$N = 1, 7, 19, 37, 61 \text{ итн. за } n = 1, 2, 3, 4, 5 \text{ итн. слоеви.}$$



Слика 2.2. Јаже, добиено со впредување на жици



Слика 2.3. Спирално сукање на жиците кај јажињата

Кај надземните водови е вообичаено да се употребуваат хомогени јажиња со нормална изведба.

Впредувањето на слоевите околу централната жица на јажето е неопходно за да се создаде **стабилна механичка конструкција** на самото јаже. За да не дојде до **засукување** (замотување) на слободното јаже, жиците **се сучат наизменично**, во спротивни насоки во поедините слоеви од јажето. Се практикува, последниот (надворешниот) слој жици да биде намотан одлево надесно.

Аксијалната должина L на јажето што одговара на еден полн круг жици во спиралата од еден слој се нарекува **чекор на сукање**, додека односот на чекорот на сукање L и пречникот на спиралата D_p се нарекува **коэффициент на сукање**.

Големината на чекорот на сукање влијае врз **електромеханичките карактеристики** на спроводникот. Со **смалување** на чекорот, се зголемува должината на жиците во јажето и со тоа се зголемува активната отпорност на спроводникот – и обратно. **Коефициентите на сукање** на разните слоеви од јажето се најчесто **различни**. Вообичаено е внатрешните слоеви да бидат сукани поретко, и тие имаат коэффициент на сукање од 16 до 27, додека надворешните слоеви се сукаат погусто и имаат помал чекор на сукање, од 12 до 20. Како резултат на тоа, механичките напрегања во јажето, предизвикани од надворешните сили на затегање, **не се распределуваат рамномерно** по сите жици и слоеви, па поради тоа силата на кинење на целото јаже е за околу 10% помала од сумарната сила на кинење на сите жици во јажето. Поради спиралното сукање, **должината на жиците е за 2-3%** поголема од должината на самото јаже.

Факторот на пополнување кај овие јажиња изнесува од 75% до 78%, т.е. вистинскиот пресек на јажето е за 22% до 25% помал од **брuto пресекот**, пресметан со помош на надворешниот (механичкиот) пречник на јажето.

Во табелата 2.2 е даден детален приказ на конструкцијата и составот на сите хомогени јажиња од алуминиум, предвидени со МКС-стандардите². Во неа, помеѓу другото, се среќаваат и термините **номинален пресек** и **вистински пресек** (фактички пресек).

Табела 2.2 Конструкција и состав на хомогените јажиња од алуминиум(Al), според МКС . N.C1.502

Номинален пресек mm ²	Вистински пресек mm ²	Состав на јажето		Надвор. пречник d mm	Маса на јажето M kg/km	Сила на кинење F_{kin} daN	Активна отпорност r_{20} Ω/km	Трајно дозволена струја A
		број	и пречник на жиците					
16	15,89	7	1,7	5,1	44	290	1,802	90
25	24,25	7	2,1	6,3	67	425	1,181	120
35	34,36	7	2,5	7,5	94	585	0,833	150
50	49,48	7	3,0	9,0	135	810	0,579	185
70	65,82	7	2,1	10,5	181	1150	0,437	225
95	93,27	19	2,5	12,5	256	1595	0,309	285
120	117,00	19	2,8	14,0	322	1910	0,246	330
150	147,10	37	2,25	15,7	406	2570	0,196	380
185	181,60	37	2,5	17,5	501	3105	0,159	435
240	242,50	61	2,25	20,2	670	4015	0,119	515
300	299,40	61	2,5	22,5	827	4850	0,080	600
400	400,10	61	2,89	26,0	1105	6190		
500	499,80	61	3,23	29,1	1381	7600		
600	586,00	61	3,5	31,5	1640	/		
700	710,00	61	3,85	34,7	1960	/		

² Во согласност со членот 24 од Законот за стандардизација, објавен во „Службен весник на Република Македонија“бр.. 23 од 27.04.1995 година, сите некогашни JUS–стандарди, кои важеа во СФРЈ ќе важат и понатаму, без измени, при што во нивниот назив зборот JUS се заменува со зборот МКС (македонски стандарди).

Вистинскиот пресек на спроводникот (јажето) претставува **геометриски збир** на плоштините на сите негови жици, додека пак **номиналниот пресек** на спроводникот (јажето) претставува **заокружена вредност** на фактичкиот пресек.

Номиналниот пресек на спроводниците служи како **име (назив)** под кое предметниот спроводник е означен односно именуван во множеството на стандардизираните типови спроводници (јажиња).

Комбинираните повеќежични спроводници (скратено наречени *комбинирани јажиња*) се изработуваат од два метала од кои едниот има **добри електрички особини** (алуминиум, бакар, алдреј, бронза и др.), а другиот пак има **добри механички особини** (нпр. челик). Во европските земји вообичаена е употребата на комбинацијата алуминиум со челик Al/Č, наречена **алучел**. Кај ваквите алучел-јажиња челичните жици се поставуваат во **централниот дел** на спроводникот, наречен **челично јадро**, а околу него се мотаат, во неколку слоеви, жиците од бакар или алуминиум (алуминиумова **обвивка**, односно алуминиумов **плашт**). Челичното јадро може да биде едножичен спроводник (жица), или пак челично јаже, составено од 7, 19, 37 и тн. жици со ист пречник. Челичните жици од јадрото треба да бидат **поцинкувани**. Пред сукањето (впредувањето) тие се мачкаат со **неутрална маст** која е отпорна на атмосферски влијанија и отпорна на температура (температура на капење над 90°C). Неутралната маст претставува **дополнителна антикорозивна заштита** на јадрото. Поради триењето што постои, врската помеѓу обвивката и јадрото кај комбинираните јажиња е фиксна и механички здрава. Триењето не дозволува да дојде до заемно поместување на челичното јадро и обвивката под дејство на надворешните механички напрегања.

Најраспространети и најчесто употребувани кај нас комбинирани јажиња се алуминиум-челик, т.е. алучел-јажињата Al/Č. Во другите земји се користат уште и јажињата алдреј-челик и AlMg/Č. Јажињата Al/Č во себе ги соединуваат добрата електрична спроводност на алуминиумот и големата механичка јакост на челикот. При исти електрични и преносни карактеристики, алучел-јажињата се за околу **два пати поефтини** од соодветните бакарни спроводници.

Комбинираните Al/Č јажиња се конструираат со разни односи на пресеците A_{Al}/A_{Fe} на алуминиумовиот плашт и челичното јадро и на тој начин се добиваат јажиња со широк спектар на механички карактеристики. Вообичаено е да се употребуваат алучел јажиња со **однос на пресеците** $\varepsilon = A_{Al}:A_{Fe} = 6:1$. Таму каде што од спроводниците се бара да имаат подобри механички својства, како на пример во планинските предели, тешко достапните терени, премините преку реки, долови и слично, се употребуваат Al/Č јажиња со однос $\varepsilon = 4,4/1$ или $\varepsilon = 1,7/1$. Со нашите стандарди е допуштена дури и употреба на Al/Č јажиња со однос на пресеците помал од еден (нпр. $\varepsilon = 0,95/1$).

Кај комбинираните Al/Č јажиња разликуваме **номинален** и **вистински пресек** на алуминиумовиот дел односно номинален и вистински пресек на челичното јадро. Означувањето на овие спроводници според нашите стандарди (MKS.N.C1.351) се врши на следниот начин:

јаже MKS.N.C1.351- A_{Al}/A_{Fe} -Al/Č.

Така, на пример, стандардното алучел-јаже со номинален пресек на алуминиевиот дел 240 mm² и номинален пресек на челичното јадро 40 mm² (види табела 2.3), правилно е да се означува со следниов назив:

јаже MKS.N.C1.351-240/40-Al/Č.

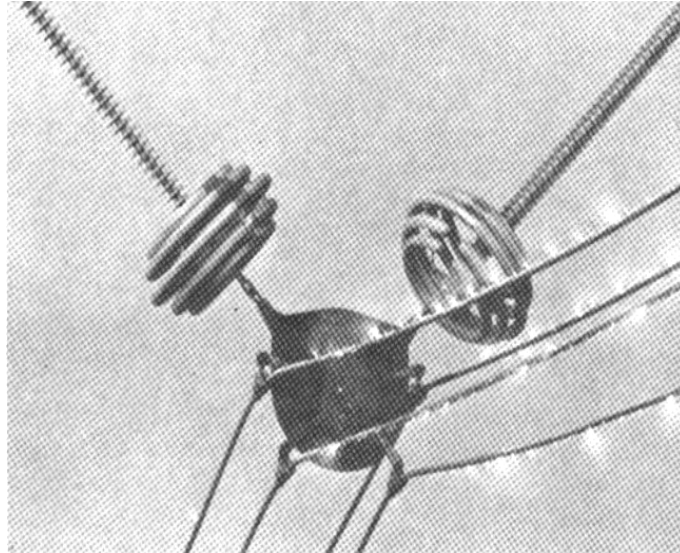
Во табелата 2.3 се прикажани конструкцијата и составот на поважните типови А1 / ^ јажиња, стандардизирани со прописите МКС . N.C1.351.

Табела 2.3. Конструкција и состав на комбинираните А1 / Џ јажиња, според МКС.N.C1.351

Номинален пресек mm ²	Вистински пресек mm ²	А1-плашт број и пречник на жиците (mm)		Џ -јадро број и пречник на жиците (mm)		Надвор. пречник на јажето d (mm)	Маса на јажето M, kg/km	Сила на кинење на јажето F _{kin} daN	Омска отпорност r ₂₀ Ω	Трајно дозвол. струја I _d , А
		број	пречник	број	пречник					
16/2,5	15,3/2,6	6	1,80	1	1,80	5,4	62	595	1,879	90
25/4	23,8/4,0	6	2,25	1	2,25	6,8	97	920	1,203	125
35/6	34,3/5,7	6	2,70	1	2,70	8,1	140	1265	0,835	145
50/8	48,3/8,0	6	3,20	1	3,20	9,6	195	1710	0,595	170
70/12	69,9/11,4	26	1,85	7	1,44	11,7	284	2680	0,413	235
95/15	94,4/15,3	26	2,15	7	1,67	13,6	382	3575	0,306	290
120/20	121,6/19,5	26	2,44	7	1,90	15,5	492	4565	0,237	345
150/25	148,9/24,2	26	2,70	7	2,10	17,1	601	5525	0,194	400
185/30	183,8/29,8	26	3,00	7	2,33	19,0	742	6620	0,157	455
210/35	209,1/34,1	26	3,20	7	2,49	20,3	845	7490	0,138	490
240/40	243,0/39,5	26	3,45	7	2,68	21,9	987	8640	0,119	530
360/57	360,2/57,3	26	4,20	19	1,96	26,6	1483	12745	0,080	675
490/65	490,3/63,6	54	3,40	7	3,40	30,6	1855	15310	0,059	840
170/40	171,8/40,1	30	2,70	7	2,70	18,9	790	7675	0,168	435
240/55	241,3/56,3	30	3,20	7	3,20	22,4	1107	10385	0,119	530
350/80	349,3/78,9	30	3,85	19	2,30	26,9	1585	14845	0,083	675
490/110	487,8/111,2	30	4,55	19	2,73	31,7	2221	20800	0,059	840
50/30	51,2/29,8	12	2,33	7	2,33	11,7	375	4380	0,564	
95/55	96,5/56,3	12	3,20	7	3,20	16,0	708	7935	0,389	
120/70	122,0/71,3	12	3,60	7	3,60	18,0	896	10000	0,299	
75/80	74,8/78,9	18	2,30	19	2,30	16,1	828	10500	0,236	

Податоците за трајно дозволениите струи I_d прикажани во последната колона од оваа табела се однесуваат за температура на воздухот θ₀ = 40°C, така што со наведените струи (при отсуство на ветер), температурата на спроводниците би ја достигнала својата максимална дозволена вредност θ = 80°C. Меѓутоа, доколку температурата на околниот воздух (амбиентот) е помала од максималната вредност θ₀ = 40°C, тогаш спроводниците ќе можат струјно појако да се оптоварат. Дозволеното струјно оптоварување на спроводниците I'_d во новите услови може да се добие со корекција на овие вредности, за што подетално ќе стане збор подоцна, во поглавјето 2.8

Јачината на електричното поле во близина на спроводниците не смее да ја пречекори електричната цврстина на воздухот (која при добри временски услови, без голема количина на влага во воздухот, изнесува околу 3 kV/mm – темена вредност) за да не дојде до искричаво празнење, наречено **корона** (сл. 2.4а).



Слика 2.4.а Корона на спроводниците од еден 500 kV вод

Грубо земено, може да се каже дека појавата на корона е елиминирана доколку надворешниот пречник на спроводникот d , изразен во mm, изнесува барем една деветина од номиналниот линиски напон на водот, изразен во kV, т.е.:

$$d > U_n / 9 .$$

Во табелата 2.4 се прикажани најмалите дозволени пресеци за стандардните алучел-јажиња со кои се постига короната да биде (барем во услови на добро време) практично елиминирана.

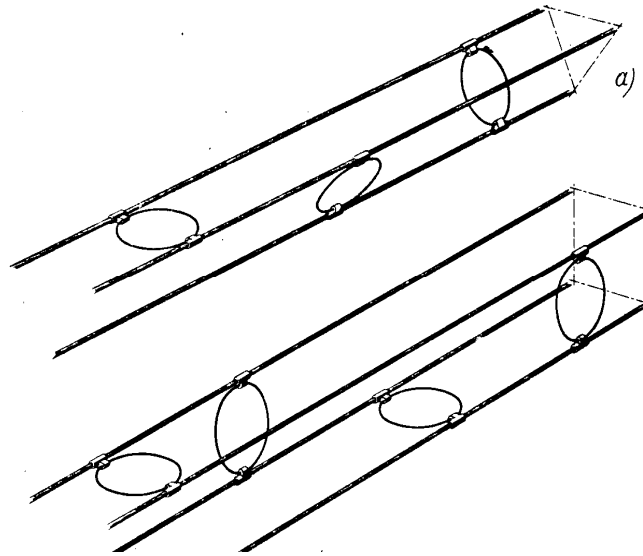
Табела 2.4 Најмали пресеци кај надземните водови заради намалување на ефектот на корона

Номинален напон на водот kV	Најмал дозволен пресек на алучел-јаже
110 kV	70/12
220 kV	240/40
380 kV	2 x 490/65

За пресеци на спроводниците наведени во табелата 2.4, како и за пресеци поголеми од нив, загубите на активна моќност кај надземните водови поради короната се мали и изнесуваат околу 1 kW/km за 110 kV надземни водови, односно **неколку kW/km** за надземни водови со повисок напон. Меѓутоа, кај надземните водови со највисок напон (500 kV и 750 kV), при лошо време, загубите поради короната можат да достигнат и вредности преку 100 kW/km , што при поголеми должини на водовите доведува до значителни загуби на моќност кои се мерливи со цуловите загуби.

Кај водовите со многу висок и супер висок напон ($U_n \geq 380 \text{ kV}$), **радиопречките и загубите на активна моќност** поради **ефектот на корона** се меродавни за определување на пречникот (пресекот) на спроводниците. Кај нив е потребно да се применуваат или премногу дебели јажиња, со доволно голем надворешен пречник, или пак **сноп** од 2, 3, или повеќе спроводници со значително помал пресек. (На пример, за водовите со номи-

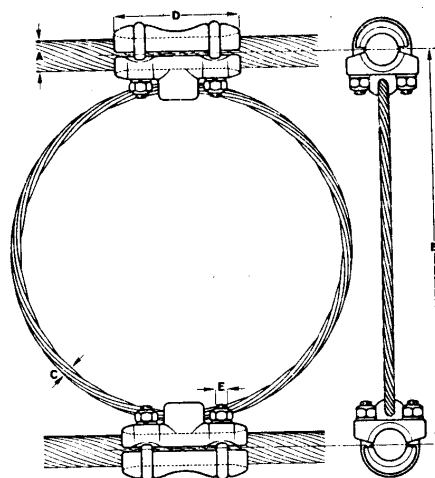
нален напон 380 kV за таа цел соодветно е јажето $Al/\check{C}-967/225 \text{ mm}^2$, кое има надворешен пречник 44,8 mm, или пак ќе треба да се употребуваат најмалку две Al/\check{C} јажиња 360/60, поставени во сноп, кои имаат скоро двојно помал пречник).



Слика 2.4.6 Спроводници во сноп (3 и 4 спроводника во снопот)

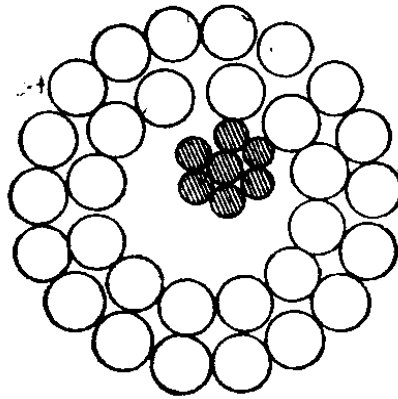
Во светот па и кај нас е вообичено овој проблем да се решава на вториот начин, со употреба на *спроводници во сноп* (слика 2.4.6).

Спроводниците во снопот се најчесто стандардни Al/\check{C} јажиња. Кај нас за водови 380 kV се употребуваат снопови од две јажиња МКС.N.C1.351-490/65- Al/\check{C} , а се оди на зголемување на нивниот број на три. Спроводниците од снопот се поставуваат во темињата на правилен многуаголник. Бројот на спроводниците во снопот може да биде 2, 3, 4 и повеќе (кај водовите со супервисок напон $U_n \geq 765 \text{ kV}$, се употребуваат дури и по осум спроводници во снопот). Меѓусебното растојание помеѓу секои два соседни спроводника во снопот е исто и обично изнесува од 30 до 40 cm. Ова растојание се одржува во просторот на тој начин што по должината на снопот, на секои 30 ÷ 50 m се монтираат *растојници (снејсери)* (сл. 2.5), кои не им дозволуваат на спроводниците од снопот да се доближуваат еден до друг.



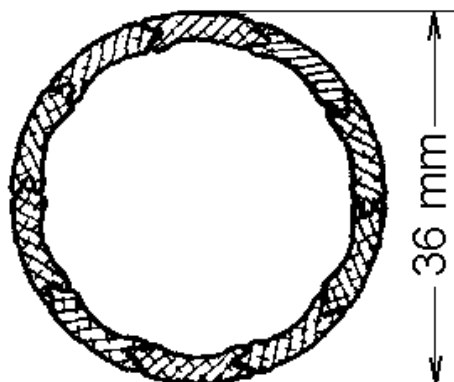
Слика 2.5 Растојник за одржување на растојанието помеѓу спроводниците во снопот

Во случај на посебни барања, се употребуваат и *специјални изведби* на спроводниците. Така, на пример, за борба со вибрациите на спроводниците под дејство на ветрот понекогаш се користат таканаречените *антивибрациони јажиња* (сл. 2.6). Тоа се комбинирани Al / ^ јажиња кај кои *челичното јадро слободно може да се движи* во самиот алуминиумов плашт. Фреквенцијата на механичките вибрации на плаштот и челичното јадро се различни, поради што, *вибрациите* на целото јаже *се придушени*, па на тој начин се намалуваат штетните последици (замор на материјалот) што може да ги предизвика ветрот. (Поради проблемите околу нивното спојување и продолжување, овие спроводници кај нас сè уште не нашле своја примена).



Слика 2.6 Конструкција на антивибрациско јаже

Некогаш кај водовите со највисок напон се применувале и шупливи спроводници (сл. 2.7). Тие се употребувале зашто имале зголемен надворешен пречник којшто е потребен за сузбивање на короната. Шупливите спроводници од бакар обично се изведуваат од сукани сегменти, но во секој случај, нивното производство е прилично сложено. Истиот ефект што го даваат шупливите спроводници може да се постигне и со употребата на таканаречените *проширени (expanded)* спроводници (САД). Кај нив челичното јадро е обложено со импрегнирана хартија и на тој начин се постигнува зголемен надворешен пречник на самиот спроводник.



Слика 2.7 Конструкција на шуплив спроводник

2.3 ФИЗИЧКИ ОСОБИНИ НА СПРОВОДНИЦИТЕ ОД ДАЛЕКУВОДИТЕ

2.3.1 Напречен пресек на спроводниците

Напречниот пресек на едножичните спроводници се пресметува со помош на следната формула:

$$A = \frac{\pi \cdot d_1^2}{4}, \quad (2.2)$$

каде што со d е означен пречникот на спроводникот.

Кај хомогените јажиња, како што беше веќе кажано, разликуваме вистински (*нето*) пресек и *брuto* пресек. Вистинскиот пресек на јажето, составно од N жици се пресметува со изразот:

$$A = \frac{N \cdot \pi \cdot d_1^2}{4}, \quad (2.3)$$

додека брuto пресекот, со изразот:

$$A_{br} = \frac{\pi \cdot d^2}{4}. \quad (2.4)$$

Во (2.2) ... (2.4) со d_1 е означен пречникот на жиците од кои што е составено јажето, а со d е означен надворешниот (механичкиот) пречник на самото јаже.

Факторот на пополнување k_p кај овие јажиња изнесува:

$$k_p = \frac{A}{A_{br}} = \frac{3n \cdot (n-1) + 1}{(2n-1)^2}, \quad (2.5)$$

и тој се движи во границите од **0,75** до **0,78** при што првиот број се однесува на јажињата со голем број слоеви ($n \rightarrow \infty$) додека вториот на јажињата со $n = 2$ слоја.

Кај комбинираниите јажиња постојат два напречни пресека – еден за алуминиумовата обвивка, а друг за челичното јадро. Иако овие спроводници се составени од два различни метала, во механичките пресметки тие *се третираат како хомогени јажиња*, кои имаат засебни - еквивалентни карактеристики. Така, на пример, еквивалентниот пресек A на едно комбинирано јаже, составено од алуминиумов плашт со пресек A_{Al} и челично јадро со пресек A_{Fe} , ќе биде еднаков на вкупниот пресек на јажето, т.е.

$$A = A_{Al} + A_{Fe} \quad (2.6)$$

2.3.2 Минимални пресеци на јажињата кај далекуводите

Со цел да се намали ризикот од прекин на спроводниците поради механички повреди, нашите прописи [1] ги ограничуваат најмалите пресеци за јажињата (чл. 15). Тие се прикажани во табелата 2.4.

Јажињата од други материјали мораат да имаат таков пресек што силата на кинење да им биде најмалку 380 daN.

Табела 2.4 Најмали дозволени пресеци на јажињата

Материјал од којшто е изработено јажето	Најмал дозволен пресек, mm ²
Алуминиум и негови легури	25
Al/Ѓ –јажиња	16
Челик	16
Бакар	10

Правилникот [1] води сметка и за можноста од **термичко преоптоварување** на спроводниците (јажињата). Нивниот пресек во исто време мора да биде доволно голем, така што температурата на јажињата поради загревањето при течењето на електричната струја (Џулови загуби) не ќе биде повисока од 80°C, под претпоставка дека температурата на околната средина изнесува 40°C (види точка 2.4).

2.3.3. Единечна тежина на спроводниците

Тежината на спроводникот по единица должина G , изразена во њутн по метар должина (N/m), се нарекува **единечна тежина**. Таа зависи од специфичната маса γ на материјалот (материјалите) од којшто е изработен спроводникот и од неговиот напречен пресек A . Кај едножичните спроводници имаме:

$$G = g \cdot \gamma \cdot A = 9,80665 \cdot \gamma \cdot A . \quad (2.7)$$

Во последната равенка со g е означено земјиното забрзување ($g = 9,80665 \text{ m/s}^2 \approx 9,81 \text{ m/s}^2$)

Кај **хомогените јажиња** тежината по единица должина ќе биде:

$$G = k \cdot g \cdot \gamma \cdot A = k \cdot 9,80665 \cdot \gamma \cdot A . \quad (2.8)$$

при што со коефициентот k се зема предвид зголемувањето на должината на жиците во јажето поради впредувањето. Притоа, за стандардизираниите хомогени јажиња од бакар или алуминиум, коефициентот k се движи во границите од 1,012 до 1,020, додека кај челичните јажиња од 1,03 до 1,085.

Кај **комбинираните јажиња** Al/Ѓ имаме:

$$G = k \cdot g \cdot (\gamma_{Al} \cdot A_{Al} + \gamma_{Fe} \cdot A_{Fe}) , \quad (2.9)$$

при што со γ_{Al} и γ_{Fe} се означени специфичните маси на алуминиумовиот плашт односно челичното јадро. За стандардните Al/Ѓ јажиња од табелата 2.2, коефициентот k се движи во границите $k = 1,012 - 1,040$.

Податоците за масата по единица должина M за хомогените и комбинираните јажиња, стандардизирани со MKS прописите се прикажани во табелите 2.2 и 2.3.

2.3.4 Специфична тежина и специфична маса на спроводниците

Тежината по единица должина G на спроводниците, редуцирана по единица напречен пресек, се нарекува **специфична тежина** на спроводникот и се означува со ρ , додека масата на спроводникот по единица должина M , редуцирана по единица пресек се нарекува **специфична маса** на спроводникот γ . Со оглед на кажаното, ќе имаме:

$$p = G / A , \quad (2.10)$$

$$\gamma = M / A . \quad (2.11)$$

Со оглед на релацијата:

$$G = g \cdot M, \quad (2.12)$$

следува релацијата:

$$p = g \cdot \gamma = 9,81 \cdot \gamma . \quad (2.13)$$

Специфичната маса на единичните спроводници ќе биде еднаква на специфичната маса на материјалот од којшто се тие направени, независно од нивниот пресек односно должина. Кај хомогените јажиња, таа ќе биде k пати поголема ($k = 1,01 - 1,02$) од специфичната маса на материјалот, додека кај комбинираниите јажиња, таа може да се пресмета со помош на изразот:

$$\gamma = \frac{\gamma_{Al} \cdot A_{Al} + \gamma_{Fe} \cdot A_{Fe}}{A_{Al} + A_{Fe}} = \frac{\varepsilon \cdot \gamma_{Al} + \gamma_{Fe}}{\varepsilon + 1}, \quad (2.14)$$

односно, со оглед на (2.13)

$$p = \frac{p_{Al} \cdot A_{Al} + p_{Fe} \cdot A_{Fe}}{A_{Al} + A_{Fe}} = \frac{\varepsilon \cdot p_{Al} + p_{Fe}}{\varepsilon + 1} . \quad (2.15)$$

Како што се гледа, величините γ и p во голема мера зависат од односот на пресеците:

$$\varepsilon = \frac{A_{Al}}{A_{Fe}} . \quad (2.16)$$

Изразите (2.7) ... (2.16) ги даваат точните вредности за тежините односно масите на спроводниците. Но во практичните механички пресметки на надземните водови, нема потреба од многу висока прецизност па Правилник [1] им дозволува на проектантите, наместо со вистинските физички својства на спроводниците, да оперираат со нивните ориентациони вредности, коишто можат да се отчитаат од табелата 2.5.

2.3.5 Модул на еластичност на спроводниците

Спроводник со должина L , изложен на затегање под дејство на надворешна механичка сила F ќе се издолжи за износ ΔL . В во областа на еластичните деформации помеѓу издолжувањето ΔL и силата на затегање F постои линеарна релација:

$$\Delta L = \frac{L}{E} \cdot \frac{F}{A} . \quad (2.17)$$

Согласно со законот на Хук (Нooke), релативното издолжување на спроводникот ΔL е:

$$\frac{\Delta L}{L} = \frac{1}{E} \cdot \frac{F}{A} = \frac{\sigma}{E} . \quad (2.18)$$

каде што со $\sigma = F/A$ е означено *напрегањето на затегање* на спроводникот, а со E е означен *модулот на еластичност* на спроводникот.

Табела 2.5. Физички својства на спроводниците од надземните водови

Материјал	Однос на пресеците ε	број на Al-жици n_{Al}	број на Fe-жици n_{Fe}	Специфична маса gr/cm^3	Температурен коефициент $\alpha \times 10^6 \text{ } 1/^\circ\text{C}$	Модул на еластичност $E \text{ daN/mm}^2$	
Al / ^ јажиња	0,86	78	91	5,45	13,7	13.400	
	0,95	18	19	5,33	13,3	13.000	
	1,4	14	7	4,91	15,0	11.000	
	1,7	12	7	4,66	15,3	10.700	
	4,3	30	7	3,75	17,8	8.200	
	4,4	30	19	3,64	18,0	8.000	
	AlMgSiE / ^ јажиња	4,4	6	1	3,64	19,2	8.100
		6	26	3	3,50	18,8	7.700
		6	26	4	3,50	18,8	7.700
	AlMgI / ^ јажиња	6	26	5	3,50	18,7	7.700
6		26	7	3,50	18,9	7.700	
6		24	7	3,50	18,6	7.400	
7,7		54	7	3,36	19,4	7.000	
7,7		54	19	3,36	19,4	6.800	
јажиња од алуминиум и негови легури	/	7	/	2,70	23,0	6.000	
	/	19	/	2,70	23,0	5.700	
	/	37	/	2,70	23,0	5.700	
	/	61	/	2,70	23,0	5.500	
јажиња од бакар	/	7	/	8,90	17,0	11.300	
	/	19	/	8,90	17,0	10.500	
	/	37	/	8,90	17,0	10.500	
	/	61	/	8,90	17,0	10.500	
јажиња од челик	/	/	7	7,80	11,0	18.000	
	/	/	12	7,80	11,0	17.500	
	/	/	19	7,80	11,0	17.500	
	/	/	37	7,80	11,0	17.500	
	/	/	61	7,80	11,0	17.500	

Модулот на еластичност на едножичните спроводници е еднаков на модулот на еластичност на материјалот од кој се тие направени (табела 2.1). Модулот на еластичност на хомогените јажиња не зависи само од материјалот туку и од конструкцијата, т.е. од бројот на жици и бројот на слоеви во јажето (види табела 2.4) Кај комбинираните Al/C јажиња модулот на еластичност ќе зависи од односот на пресеците ε но и од конструкцијата на самото јаже. Тој може да се пресмета со помош на релацијата (2.19), но за неговото определување прописите дозволуваат да се користи табелата 2.4.

$$E = \frac{E_{Al} \cdot A_{Al} + E_{Fe} \cdot A_{Fe}}{A_{Al} + A_{Fe}} = \frac{\varepsilon \cdot E_{Al} + E_{Fe}}{\varepsilon + 1} \quad (2.19)$$

2.3.6. Температурен коефициент на линеарното издолжување

Кога температурата θ на спроводник со должина L се измени за износ $\Delta\theta$, должината на спроводникот ќе се измени за износ ΔL . притоа важи:

$$\Delta L = \alpha \cdot L \cdot \Delta\theta. \quad (2.20)$$

Во релацијата (2.20), со α е означен температурниот коефициент на линеарното издолжување на спроводникот.

Едножичните спроводници и повеќежичните хомогени јажиња имаат температурен коефициент α кој е еднаков на температурниот коефициент на материјалот од којшто се тие изработени. Кај комбинираниите јажиња овој коефициент ќе зависи од односот на пресеците ε и од употребените материјали. Температурниот коефициент α на **еквивалентното хомогено јаже** со кое во пресметките може да се замени комбинираното Al/\check{C} јаже, се пресметува со помош на изразот (2.21):

$$\alpha = \frac{\alpha_{Al} \cdot E_{Al} \cdot A_{Al} + \alpha_{Fe} \cdot E_{Fe} \cdot A_{Fe}}{E_{Al} \cdot A_{Al} + E_{Fe} \cdot A_{Fe}} = \frac{\varepsilon \cdot \alpha_{Al} \cdot E_{Al} + \alpha_{Fe} \cdot E_{Fe}}{E \cdot (\varepsilon + 1)}, \quad (2.21)$$

но и во тој случај, попрактично е за таа цел да се користи табелата 2.4.

Формулите (2.19) и (2.21) за пресметка на карактеристиките E и α на еквивалентното хомогено јаже со кое во механичките пресметки се заменува предметното Al/\check{C} јаже, можат лесно да се докажат доколку се усвои дека се точни следните претпоставки:

- 1) по изработката на јажето, во жиците нема механички напрегања;
- 2) при затегањето на јажето доаѓа до истовремено затегање како на алуминиумовата обвивка така и на челичното јадро и тие притоа претрпуваат исти еластични деформации;
- 3) помеѓу алуминиумовата обвивка и челичното јадро триењето е доволно големо па нема меѓусебно поместување ниту при затегање на јажето ниту при неговото собирање под дејство на смалената температура.

Овие претпоставки можат во голема мера да се сметаат за точни.

2.3.7 Дозволени напрегања на затегање на спроводниците

Со цел да се зголеми сигурноста во погонот, со правилникот [1] е извршено нормирање (ограничување) на големината на напрегањата на затегање што смеат да се јават кај спроводниците и јажињата од далекуводите во разни услови. Во таа смисла се разликуваат два вида дозволени напрегања:

- *нормално дозволено напрегање* и
- *исклучително дозволено напрегање*.

Наедно со нив, овде ќе се запознаеме и со терминот:

- *максимално работно напрегање*.

Максималното работно напрегање σ_M на затегање на спроводникот (јажето) претставува **однапред избрана пресметковна вредност** што **хоризонталната компонента на напрегањето на затегање** во спроводникот (јажето) σ_x ја постигнува при -5°C со нормален зимски додатен товар (НЗДТ) (види поглавје 7.1) или, пак, при -20°C без зимски додатен товар. Вредноста на избраното максимално работно напрегање σ_M , според Правилникот [1], не смее да биде поголемо од вредноста на нормалното дозволено напрегање σ_{nd} , пропишано со истот тој Правилник (види табела 2.6).

Табела 2.6 Дозволени напрегања на затегање на јажињата од надземните водови според Правилникот [1]

Материјал	Однос на пресеците ε	Дозволено напрегање на затегање	
		Нормално σ_{nd} [daN/mm ²]	Исклучително σ_{id} [daN/mm ²]
алучел јажиња Al/Č	0,86	27,5	52,0
	0,95	27,5	51,5
	1,4	24,0	45,0
	1,7	22,0	41,0
	4,3	14,5	27,0
	4,4	14,0	26,0
	6	13,0	24,5
	7,7	11,0	21,0
	11,3	10,0	18,5
	14,5	9,0	16,5
23,1	8,0	15,0	
јажиња AlMgSiE/Č	0,86	30,0	56,0
	0,95	29,5	55,0
	1,4	26,5	48,5
	1,7	24,5	46,5
	4,3	18,0	34,5
	4,4	18,0	34,5
	6	16,5	31,0
	7,7	15,5	29,5
	11,3	14,5	27,0
	14,5	14,0	26,0
23,1	13,0	24,5	
	0,86	29,0	55,0
	0,95	29,0	55,0
	1,4	25,5	48,0
	1,7	22,5	42,0
јажиња AlMgIE/Č	4,3	17,5	32,0
	4,4	16,5	30,5
	6	14,5	27,0
	7,7	14,5	27,0
	11,3	12,8	24,0
	14,5	11,7	22,0
	23,1	11,6	21,8
јажиња од Al	/	6,0	11,0
AlMgSiE јажиња	/	10,5	20,0
AlMgIE јажиња	/	9,0	17,0
јажиња од бакар	/	16,0	30,0
јажиња од челик:			
Č I (Čelik I)	/	14,5	26,5
Č II (Čelik II)	/	26,0	49,0
Č III (Čelik III)	/	49,5	93,0
Č IV (Čelik IV)	/	59,5	111,0

Напрегањето на затегање во **точката на зацврстување** (т.е. обесување) на спроводникот при температура од -5°C со **исклучителен зимски додатен товар (ИЗДТ)** (види поглавје 7.1) не смее да биде поголемо од вредноста на исклучителното дозволено напрегање σ_{id} , пропишана со Правилникот (табела 2.6).

Од горе кажаното произлегува дека нормалното дозволено напрегање σ_{nd} , пропишано со Правилникот, се однесува на **хоризонталната компонента на напрегањето** (која е иста со напрегањето на затегање во **темето од синцирницата** на спроводникот), додека исклучителното дозволено напрегање σ_{id} се однесува на напрегањето на затегање **во точката на зацврстување** на спроводникот.

Нормалните дозволени напрегања на јажињата кај далекуводите ја достигнуаат вредноста од околу **40% од напрегањето на кинење**, (кај едножичните спроводници од сигурносни причини таа изнесува околу **25%**), додека исклучителните дозволени напрегања ја достигнуаат приближно вредноста од **75%** од напрегањето на кинење на спроводникот (јажето).

2.4 СТРУЈНА ОПТОВАРЛИВОСТ НА СПРОВОДНИЦИТЕ И ЈАЖИЊАТА

Кога низ спроводниците тече струја I , поради џуловиот ефект во нив се создава топлина, пропорционална на I^2 . Поради тоа, температурата θ на спроводникот низ кој што тече струја е секогаш поголема од температурата θ_0 на околната средина (воздухот) за некоја вредност $\Delta\theta$, т.е.

$$\theta = \theta_0 + \Delta\theta.$$

Величината $\Delta\theta$ ја нарекуваме **надтемпература** на спроводниците. Таа зависи од големината на струјата I што тече и од условите за ладење на спроводниците (струење на околниот воздух, сончево зрачење и др.).

Во услови на **топлинска рамнотежа** (трајно оптоварени спроводници со константна струја и непроменети услови на ладење), надтемпературата $\Delta\theta$ е константна. Тоа значи дека во тој случај сета топлина што се создава во спроводниците се оддава по пат на **конвекција (80% - 90%)** и **зрачење (10% - 20%)** на околната средина.

Кај нас, за голите спроводници и јажиња, се дозволува најголема надтемпература **$\Delta\theta = 40^{\circ}\text{C}$** , што значи дека при максимална температура на воздухот $\theta_0 = 40^{\circ}\text{C}$, температурата на спроводниците ќе биде $\theta = 80^{\circ}\text{C}$. Во услови на отсуство на ветер, допуштеното струјно оптоварување I_d на јажињата кај надземните водови со разни пресеци е дадено во табелата 2.7.

Табела 2.7 Дозволени струјни оптоварувања на спроводниците и јажињата кај надземните водови

Номинален пресек, mm ²	Cu јаже	Al јаже	Алдреј јаже	Al/Č јаже со ном. пресек	
6	60	-	-	-	-
10	85	-	-	-	-
16	115	90	90	16/2,5	90
25	150	120	115	25/4	125
35	175	150	120	35/6	145
50	230	185	175	50/8	170
70	280	225	215	70/12	235
95	360	285	270	95/15	290
120	410	330	315	120/20	345
150	480	380	365	150/25	400
185	545	435	415	185/32	455
240	640	515	490	240/40	530
300	750	600	570	300/50	615
-	-	-	-	360/60	675
-	-	-	-	490/65	840

Табелата 2.7 се однесува за температура на воздухот $\theta_0 = 40^\circ\text{C}$, така што со наведените струи (при отсуство на ветер), температурата на спроводниците би ја достигнала својата максимална дозволена вредност $\theta = 80^\circ\text{C}$. Меѓутоа, доколку температурата на околниот воздух е помала од максималната вредност $\theta_0 = 40^\circ\text{C}$, тогаш спроводниците ќе можат **струјно појако да се оптоварат**. Дозволеното струјно оптоварување на спроводниците I'_d во новите услови може да се добие со корекција на вредностите од табелата 2.6, според релацијата:

$$I'_d = k_f \cdot I_d \quad (2.21)$$

Зависноста на корекциониот фактор k_f од температурата на околниот воздух е дадена во табелата 2.8:

Табела 2.8 Зависност на корекциониот фактор k_f од температурата на амбиентот

θ [$^\circ\text{C}$]	40	30	20	10	0
k_f	1,00	1,12	1,22	1,30	1,36

3 ИЗОЛАТОРИ КАЈ НАДЗЕМНИТЕ ВОДОВИ

Изоляторите се елементи од надземните водови што служат за **прицврстување** на спроводниците за носечките конструкции од столбовите. Истовремено, тие претставуваат и **изолациони елементи** кои спречуваат струјата да тече помеѓу фазните спроводници или да тече низ столбовите во земјата. Имајќи ја предвид нивната важна функција, пред изоляторите се поставуваат низа барања, како во електрички, така и во механички поглед. Се разбира, доколку сакаме да обезбедиме сигурен и квалитетен погон на далекуводите, изоляторите ќе треба електрички и механички да ги димензионираме така што тие целосно ќе ги задоволуваат поставените барања во поглед на својата функција.

Изоляторите мораат да имаат доволна електрична **цврстина на прескок** која од своја страна пак зависи од нивните димензии и облик. Кога ќе настане **прескок** кај изоляторот, доаѓа до појава на **електричен лак** во воздухот по должината на самиот изолятор. Оваа појава е сосема непожелна бидејќи таа доведува до појави на **куси врски** во ЕЕС и до **прекин на работата** на самиот вод како и на други елементи од системот. Освен тоа, самиот лак на местото на неговото настанување може да ги **оштети** или **уништи** како спроводникот така и изоляторот.

Покрај цврстината на прескок, изоляторите мораат да имаат и доволна **цврстина на пробој**. Оваа цврстина пак зависи од внатрешните димензии на изоляторите и од диелектричните особини на материјалот од којшто се направени. Доколку дојде до **електричен пробој** на некој изолятор, кусата врска настанува низ самиот изолятор, а тоа скоро редовно доведува до негово уништување. Затоа, изоляторите треба да се димензионираат и дизајнираат така што нивната цврстина на пробој ќе биде **поголема** од цврстината на прескок.

Освен барањата во поглед на **електричната цврстина**, од изоляторите се бара да имаат и определена **механичка цврстина**. Тие исто така треба да бидат отпорни и на разните атмосферски влијанија. Од особено значење за изоляторите е нивната отпорност на наглите **промени на температурата** до кои доаѓа при појавата на електричен лак долж изоляторот.

3.1 МАТЕРИЈАЛИ ЗА ИЗОЛАТОРИТЕ

Изоляторите за далекуводите се изработуваат од најквалитетни керамички изолациони материјали што се одликуваат со голема механичка и голема електрична цврстина. За изработка на изолатори за надземните водови главно се користат три врсти материјал: електропорцелан, стеатит и стакло.

Електропорцеланот во основа претставува смеша од **каолин**, **кварц** и **глиненец (фелдшпат)** во однос 2:1:1. Од овој однос зависи какви ќе бидат особините на порцеланот. Поголемиот процент на глиненец дава поголема **електрична цврстина на пробој**, поголемиот процент на кварц дава поголема **механичка цврстина**, додека пак поголемиот процент на каолин дава поголема **отпорност спрема температурните промени**.

Технологијата на порцеланот бара големо **искуство и традиција**, како во поглед на изборот на односот на суровините во смешата, така и во поглед на самата изработка.

Електропорцеланот ги има следните својства:

– цврстина на притисок $40 \div 45 \text{ daN/mm}^2$,

–цврстина на затегање $3 \div 5 \text{ daN/mm}^2$,

–пробојна цврстина $34 \div 38 \text{ kV/mm}$.

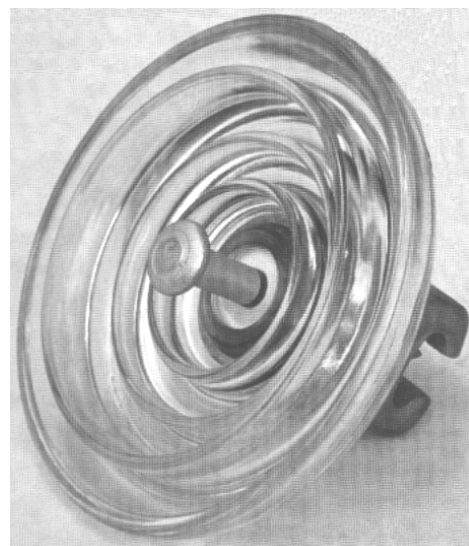
Во зависност од составот на смешата, порцеланот се пече на температура од $1350 \div 1450^\circ\text{C}$ за време од 30 до 70 часа. Во текот на сушењето и печењето на порцеланската маса настануваат големи волуменски контракции (10–20%) поради што е отежнато производството на предмети од електропорцелан со стандардни димензии и мали отстапувања (толеранции) во димензиите.

Површината на така испечениот порцелан е рапава. Како таква, таа ги задржува нечистотиите и влагата со што се намалува површинскиот отпор на изолаторот. Поради ова, површината од порцеланот се глазира и потоа тој повторно се пече. Глазурата претставува мазен слој од стакло, со дебелина $0,2 - 0,3 \text{ mm}$. На глазурата и се дава кафена или темно зелена (многу ретко бела) боја што придонесува за побрзото испарување на нафатената влага под дејство на сончевите зраци. Темните бои исто така помагаат механичките оштетувања и трагите од настанатите пукнатини на изолаторот да бидат полесно воочливи.

Глазурата го штити порцеланот од продор на влага. Таа е исто така отпорна на разни хемиски агресивни материи, а при дожд лесно се мие од нафатените нечистотии. Отпорна е и на површинските (таканаречени “лизгачки” односно “ползечки”) струи кои се присутни кај изолаторите во услови на загадување, а отпорна е и на електричниот лак.

Стеатитот претставува исто така електроизолационен керамички материјал, сличен на порцеланот. Кај него глиненецот е главно заменет со магнезиев силикат, поради што тој има поголема механичка цврстина. Затоа и изолаторите од стеатит се одликуваат со висока механичка цврстина а се употребуваат главно во оние случаи каде што се очекуваат големи механички напрегања (на пример кај спроводните изолатори, изолаторите за изведба на прекинувачи, разделувачи и др).

Стаклото како изолациски материјал во последно време се користи многу често, како во светот, така и кај нас, за водовите со висок и највисок напон ($U_n \geq 110 \text{ kV}$). Се одликува со добра електрична и механичка цврстина и лесно се обработува, а технолошкиот процес за производство на стаклените изолатори е прилично едноставен. Формираните стаклени изолатори, сè уште загреани, со посебна постапка се калат во струја од ладен воздух со што стаклото добива значително поголема механичка цврстина и поголема отпорност на температурните промени. Заради тоа, стаклените изолатори во погонот се покажале како подобри и посигурни од порцеланските како во електрички така и во механички поглед.



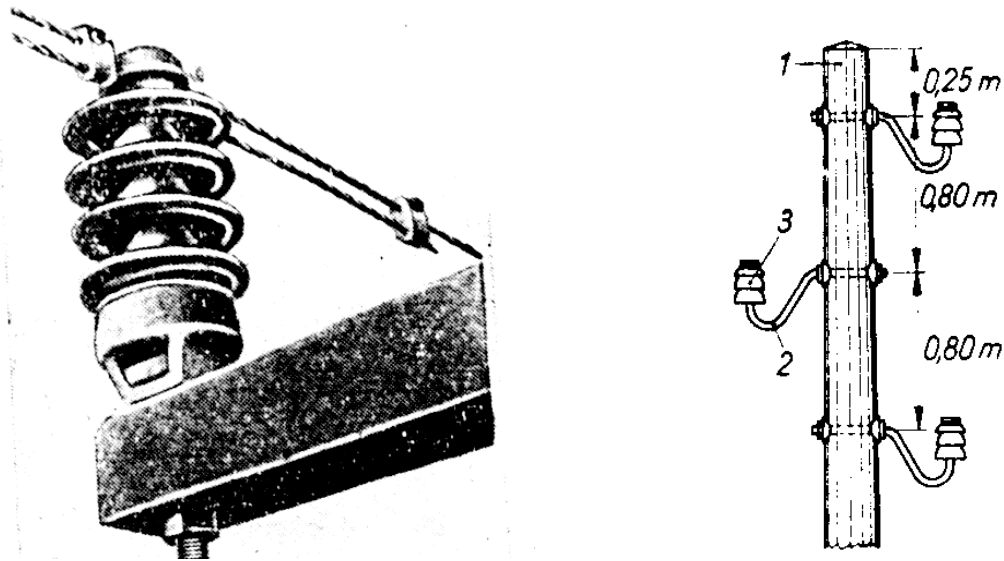
Слика 3.1 Стаклен капест изолатор (изолаторска единица)

Стаклените изолатори се употребуваат претежно кај водовите со највисок напон (220 kV и повеќе), каде што барањата во поглед на електромеханичката цврстина, сигурноста и квалитетот на погонот се најголеми.

3.2 ПОДЕЛБА НА ИЗОЛАТОРИТЕ

Според начинот на прицврстување за електричните столбови, изолаторите кај надземните водови се делат на *потпорни* и *висечки*.

Потпорните изолатори се применуваат кај водовите со низок и среден напон (до 35 kV). Овие изолатори преку специјални *челични потпори* се прицврстуваат фиксно за столбовите (сл. 3.2а и б).

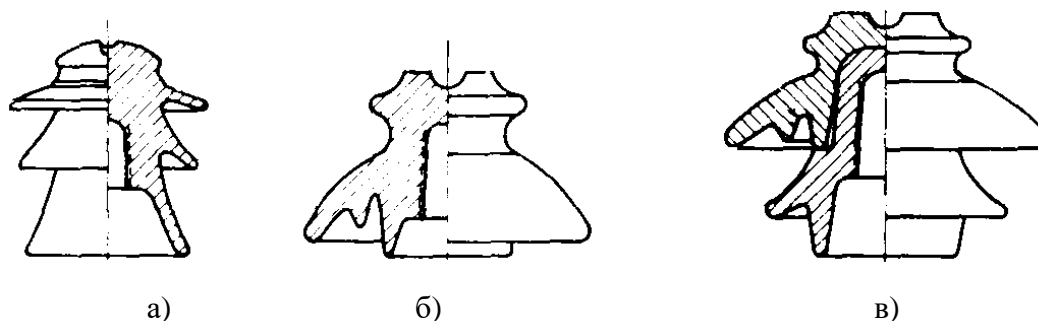


Слика 3.2.а Потпорен 35 kV изолятор монтиран на бетонска конзола (лево); потпорни изолатори монтирани на 0,4 kV дрвен столб (десно)



Слика 3.2.б Потпорни изолатори на 10 kV бетонски столб

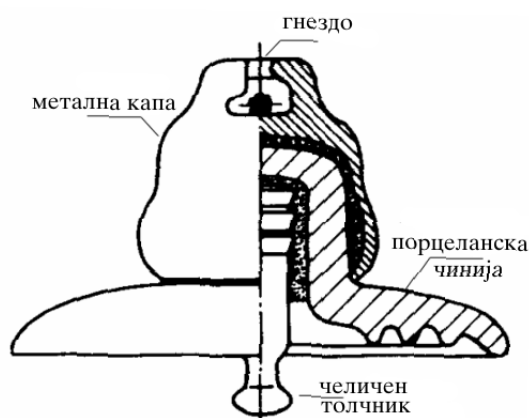
Спроводниците се сместуваат во посебен **жлеб** на изолаторот (одозгора или пак од страна) и се прицврстуваат за него со **сврзна жица** или пак со **посебни стегалки**. На сликите 3.2а и 3.2.б се прикажани неколку типови потпорни изолатори, наменети за водови со номинален напон 10, 20 и 35 kV.



Слика 3.2в. Потпорни изолатори за водови со среден напон

а) Тип D (MKS N.F1.105) б) Тип I 165 (MKS N.F1.101) в) Тип I 220 (MKS N.F1.102)

Висечките изолатори (изоляторски синџири) се применуваат кај водовите со номинален напон над 20 kV (види сл. 1.3 и сл. 3.4). Тие се составени од поголем број членови (единици) кои имаат форма на капа, поради што се нарекуваат **капести изолатори** (сл. 3.1. и 3.3).

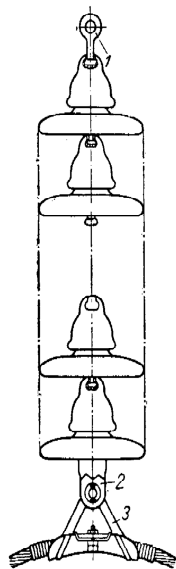


Слика 3.3 Приказ на класичен капест изолатор, тип K3 (K170/280)

Капестите изолатори на долниот дел имаат **метален држач**, а на горниот дел **метална капа**, изработена од **темпер лив**. Металната капа е цврсто споена со изолатиониот дел од изолаторот. На својот горен дел таа има отвор наречен „гнездо“, кој е погоден за вметнување и прицврстување на металниот држач од соседниот изолатор (т.н. „толчник“). На тој начин овозможено е механички да се поврзуваат повеќе елементи (капести изолатори), со што се формира таканаречениот **изоляторски синџир** или **изоляторска верига** (слика 3.4).

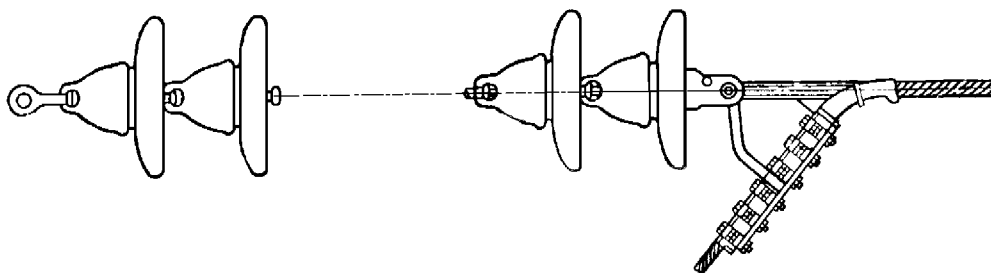
Изоляторските синџири се составени од поголем број изоляторски членови, зависно од номиналниот напон на водот за кој се наменети. Така на пример, за вод со номинален напон 20 kV, доволен е само еден член; за 35 kV водови – два члена; за 110 kV водови – шест члена итн.

Примената на изолаторските синџири, составени од поголем број изолаторски членови има повеќе добри страни. Изолаторите, пред сè, **не се механички напрегнати на совивање** туку само на истегање, па затоа нивниот број во синџирот е практично неограничен. Ако еден изолаторски член во синџирот биде електрички пробиеен или **оштетен**, останатите членови ќе бидат доволни да ги издржат електричните напрегања до првата прилика, кога оштетениот елемент ќе биде **заменет** со нов. Замената е едноставна и брза, а во многу земји, таа се изведува во текот на погонот – под напон.



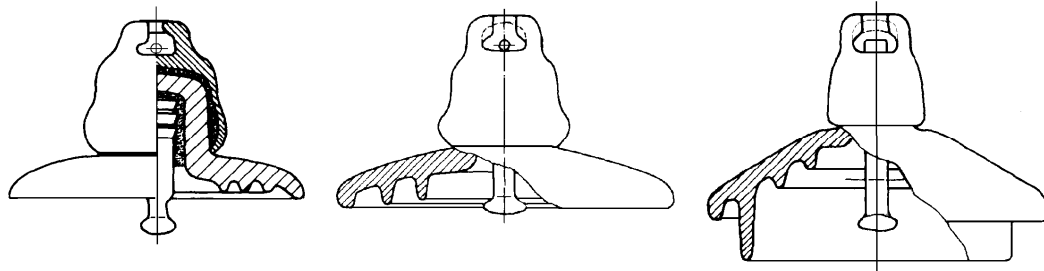
Слика 3.4.а Приказ на изолаторски синџир

Слика 3.4.б Изглед на изолаторски синџир

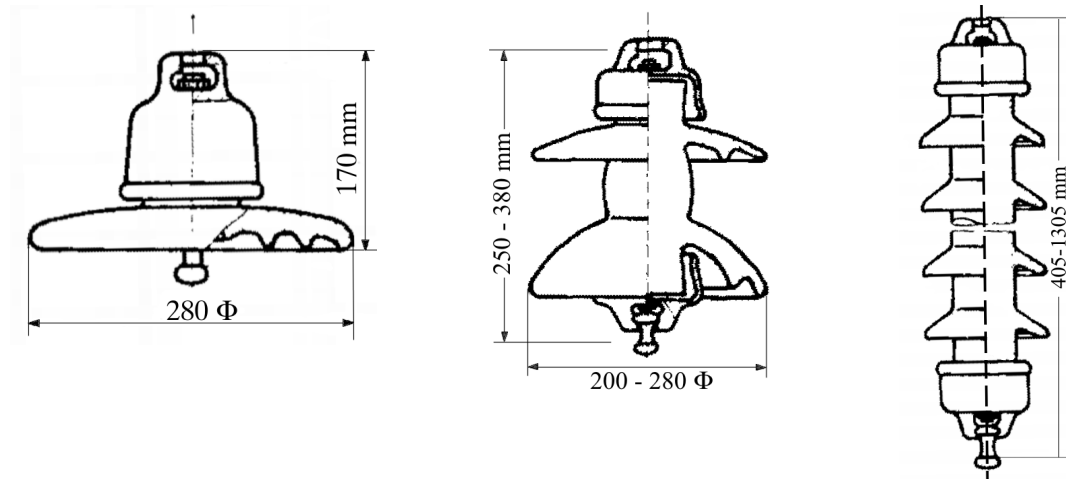


Слика 3.4.в Приказ на затезен изолаторски синџир

Од порцеланските висечки изолатори, најчесто се применуваат капестите изолатори (слики 3.3. и 3.6.а). Кај нив, во **порцеланското тело** одоздола е всаден **метален држач** во форма на **толчник**, а одозгора е всадена **метална капа**, која на горниот дел има специјален отвор – **гнездо**. Овие изолатори лесно се произведуваат. Во механички поглед се покажале како доста сигурни, зашто многу ретко се случува во погонот да дојде до прекин на врската помеѓу металната капа и самиот држач, односно до прекин на самиот изолаторски синџир и паѓање на спроводникот. Недостаток им е што се подложни на внатрешни пробои, чие детектирање е прилично тешко и бара специјални електрични испитувања за време на погонот.



Слика 3.5 Капести изолатори за надземните водови



**а) капест изолятор
тип КЗ**

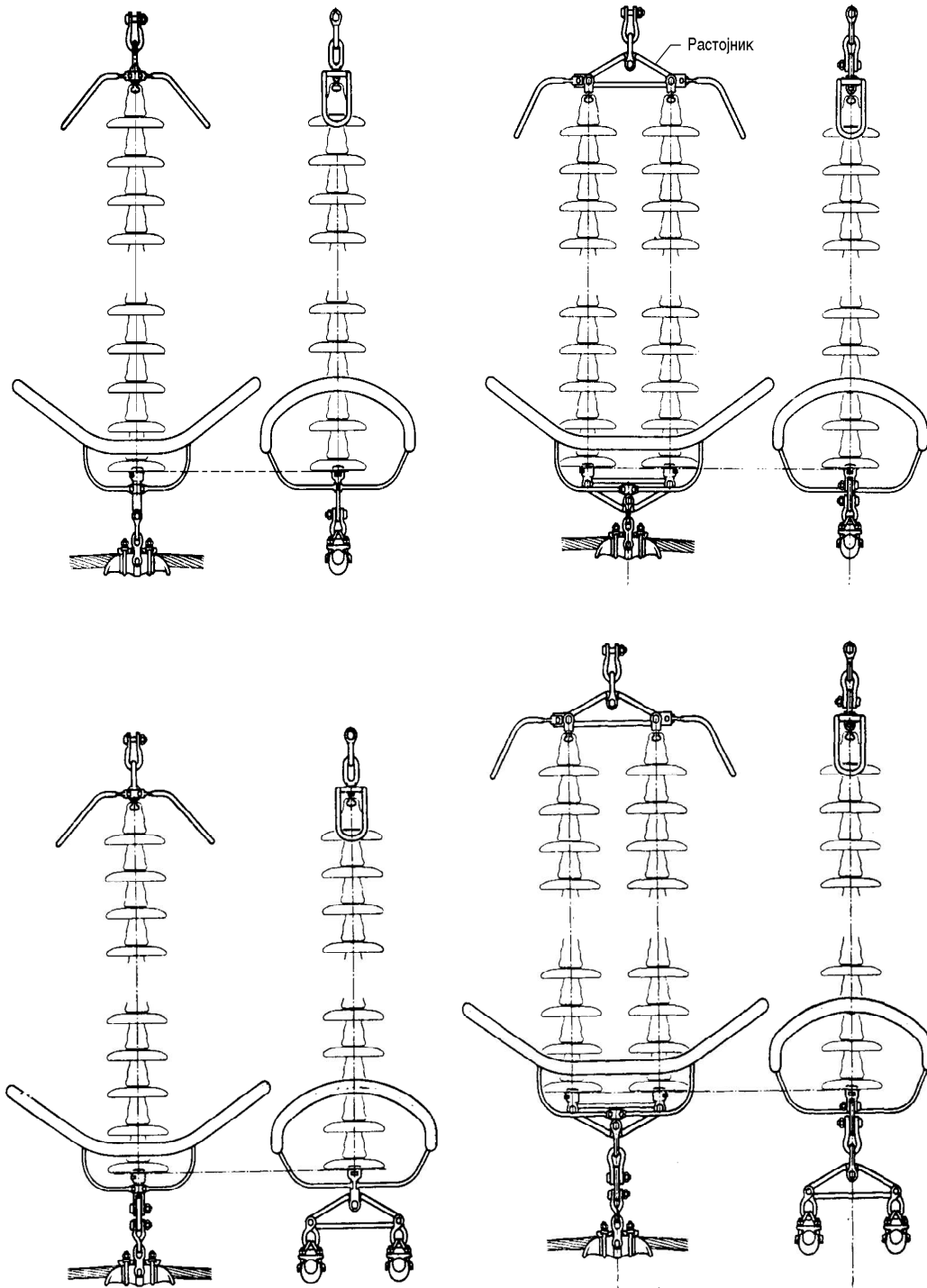
**б) масивен изолятор
тип М (VK).**

**в) стапест изолятор тип
L (VKL)**

Слика 3.6 Висечки изолатори за надземните водови

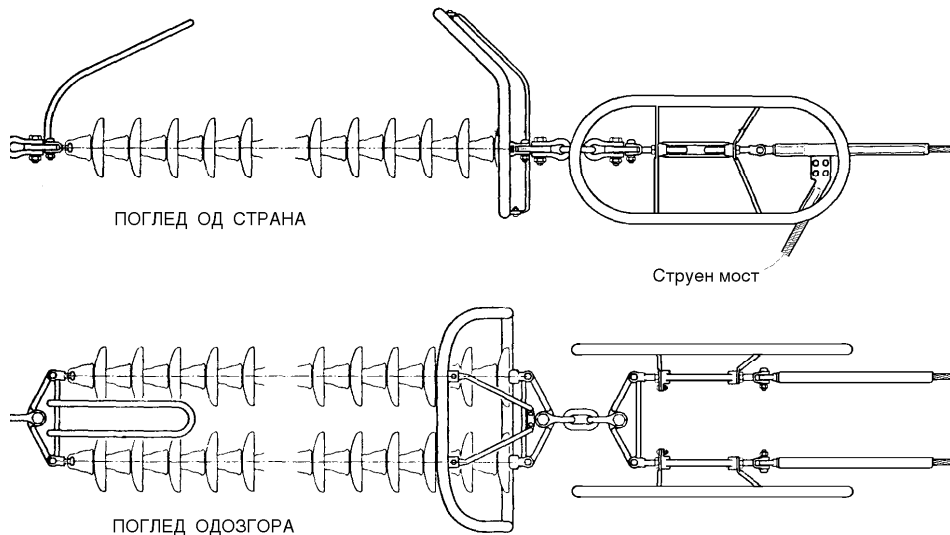
Во Европа доста често се употребуваат *масивните* (слика 3.6.б) и *стапестите* (слика 3.6.в) изолатори. Овие изолатори имаат предност во однос на другите, поради својата голема цврстина во поглед на внатрешните пробои. Тие се практично неосетливи на внатрешни пробои па затоа нивното испитување во погонот не е потребно. Недостаток им што порцеланот кај овие изолатори може да биде силно напрегнат на истегање (цврстината на истегање на порцеланот е значително помала од цврстината на притисок) што обично доведува до механички оштетувања на изоляторот и до прекин на изоляторскиот синџир. Затоа овие изолатори обично се изработуваат од материјали со поголема механичка цврстина (на пример од стеатит).

На сликите 3.7 и 3.8 се прикажани различни врсти на изоляторски синџири, составени од капести изолатори за водовисо напон $U_n \geq 110 \text{ kV}$.



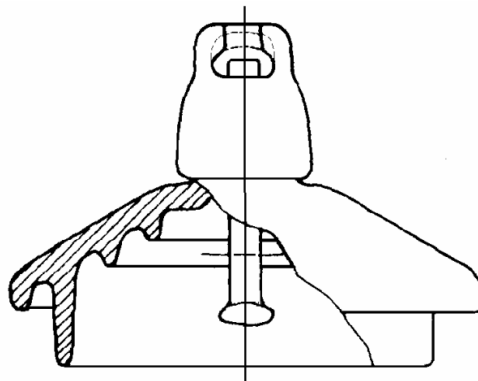
Слика 3.7 Носечки (висечки) изолаторски синџири (вериги) за висок и највисок напон ($U_n \geq 110 \text{ kV}$)

а) единечен (горе лево); б) двоен (горе десно); в) единечен, наменет за два спроводника во сноп (долу); г) двоен, наменет за два спроводника во сноп (долу)



Слика 3.8 Двоен затезен изолаторски синџир, за два спроводника во сноп (заедно со заштитните рогови и прстени)

За да се добие доволна цврстина на прескок, изолаторите се обликуваат така што тие ќе имаат долга прескочна патека по својата површина. Истовремено, потребно е дел од оваа патека да биде перманентно сув, дури и за време на дожд. На тој начин се спречува појавата на ползечки струи кои настануваат обично тогаш кога изолаторот е површински загаден и навлажнет и кои често предизвикуваат електричен прескок. Затоа, за далекуводите што минуваат низ подрачја каде што е можно загадувањето на изолацијата (индустриски области, близина на термоелектрани, цементарници, морски брег и слично), се употребуваат *маглени* капести изолатори.



Слика 3.8 Маглен капест изолатор

Овие изолатори имаат значително *подолга прескочна струјна патека* а поради тоа и поголема електрична цврстина на прескок во неповолни атмосферски услови, но, се разбира, и поголема цена отколку обичните капести изолатори. Покрај капестите маглени изолатори, постојат и маглени *стапесту* изолатори и тие служат за истата намена. Маглените капести изолатори се изработуваат од порцелан, а во поново време се произведуваат и маглени капести изолатори од стакло.

3.3 ИЗБОР НА ИЗОЛАТОРИТЕ СО ОГЛЕД НА МЕХАНИЧКИТЕ НАПРЕГАЊА

Изолаторите, односно изолаторските синцири, се димензионираат во механички поглед така што со определен степен на сигурност тие треба да ги издржат силите што дејствуваат во погонот врз нив.

Кај затезните столбови влечната сила на спроводниците директно се пренесува на изолаторите. Затоа, за механичкото димензионирање на затезните изолатори, меродавна ќе биде влечната сила на спроводниците, која се добива кога пресекот на спроводникот A се помножи со максималното работно напрегање σ_M , т.е:

$$F_{\text{mer}} = \sigma_M \cdot A. \quad (3.1)$$

Кај носечките столбови, хоризонталната компонента на влечната сила на спроводниците од едната страна на изолаторите е во рамнотежа со хоризонталната компонента на влечната сила на спроводниците од другата страна. Поради тоа на изолаторите се пренесува нивната резултанта која има строго вертикалната компонента којашто се должи на тежината на спроводникот. Затоа, кај носечките изолатори меродавна сила за механичкото димензионирање ќе биде тежината на спроводниците заедно со тежината на нормалниот зимски додатен товар што може да се нафати на нив, т.е.

$$F_{\text{mer}} = (G + \Delta G) \cdot a_{\text{grav}} + G_{\text{iz}}. \quad (3.2)$$

каде што a_{grav} е т.н. *гравитационен распон* на водот (види глава 7), G и ΔG се сопствената тежина на јажето и тежината на зимскиот додатен товар по единица должина, а G_{iz} е тежината на самиот изолатор.

При изборот на изолаторските синцири формирани од капести изолатори, меродавна е *електромеханичката цврстина* која мора да биде барем 3 пати поголема од *меродавната сила* F_{mer} , што се пренесува на изолаторскиот синцир, дефинирана на погоре изнесениот начин. Кај масивните и стапестите изолатори, меродавна е нивната *прекидна цврстина* која исто така мора да биде барем 3 пати поголема од меродавната сила F_{mer} . Кај потпорните изолатори, прекидната цврстина мора да биде барем 2,5 пати поголема од меродавната сила за механичко димензионирање на изолаторот.

Ако еден потпорен изолатор или изолаторски синцир во дадените услови не задоволува во механички поглед, тогаш се употребуваат повеќе изолатори односно изолаторски синцири. Тие се поставуваат „паралелно“, во механичка смисла на зборот, така што заеднички ја преземаат вкупната сила. Притоа, употребениот споен прибор мора гарантирано да обезбеди, вкупната сила на затегање подеднакво да се распредели по поедините изолатори односно изолаторски синцири.

Во некои случаи, прописите бараат и *појачана механичка сигурост* на изолацијата (на пример кога водот минува низ *населено место*, кога преминува *пловна река*, *автопат* и слично). Во тие случаи, се употребуваат повеќекратни (*двојни*, *тројни* итн.) изолатори односно изолаторски синцири, така што во случај на прекин на едниот од нив, останатите ќе можат со доволна сигурност да ги издржат постојните сили.

3.4 ИЗБОР НА ИЗОЛАТОРИТЕ СО ОГЛЕД НА ЕЛЕКТРИЧНИТЕ НАПРЕГАЊА

Изолацијата кај далекуводите во електричен поглед се димензионира во однос на *внатрешните* (склопни односно комутациони) *пренапони*, кои се јавуваат при разни комутации во мрежата, или пак во однос на *надворешните*, односно *атмосферските пренапони* што настануваат при атмосферските празнења. Обично, во поглед на електричното димензионирање на изолацијата кај далекуводите, основ за димензионирањето се внатрешните пренапони.

Висината на внатрешните пренапони зависи од *највисокиот погонски напон на мрежата*, но зависи и од *начинот на заземјување* на нејзината неутрална точка (т.е. ѕвездиште). Грубо земено, се смета дека факторот на склопните пренапони¹ е од ред на големина 2–3 за мрежи со заземјена нулта точка, односно 3–4 за мрежи со изолирана или индиректно заземјена неутрална точка.

Затоа, водејќи сметка за горе реченото, со прописи се утврдува колкави се напоните што треба да ги издржи во погонот изолацијата на водот, со цел да се овозможи нормална работа на електроенергетските системи (ЕЕС).

Според нашите *прописи*, се смета дека изолаторот односно изоляторскиот синцир, комплетно составен заедно со својот заштитен прибор (доколку го има), мора во поглед на *подносливите напони* да ги задоволува вредностите дадени во табелите 3.1, 3.2 и 3.3. *Степенот на изолацијата* (намален или полн), што фигурира во овие табели, се бира според изложеноста на водот на атмосферски или склопни пренапони, начинот на заземјувањето на неутралната точка и видот на пренапонските заштитни направи (ако се применети), со кои водот се штити од пренапони.

Табела 3.1 Подносливи напони за изолаторите кај среднонапонските надземни водови

Номинален напон kV	Највисок напон на опремата, kV (еф. вредност)	Номинален поднослив ударен напон, kV		Номинален краткотраен поднослив напон 50 Hz, kV (еф. вредност)
		Намален степен	полн степен	
3	3,6	20	40	10
6	7,2	40	60	20
10	12,0	60	75	28
20	24,0	95	125	50
35	38,0	145	170	70

¹ Факторот на пренапони се дефинира како однос помеѓу најголемата моментална вредност на пренапонот кој што се јавува во преодниот режим и темената вредност на погонскиот напон со фреквенција 50 Hz што постоел непосредно пред појавата на пренапонот.

Табела 3.2 Подносливи напони за изолаторите кај надземните водови со висок напон

Номинален напон kV	Највисок напон на опремата, kV (еф. вредност)	Највисок поднослив атм. ударен напон kV (темена вредност)	Номинален краткотраен поднослив напон 50 Hz, kV (еф. вредност)
110	123	450	185
110	123	550	230
220	245	650	275
220	245	750	325
220	245	850	360
220	245	950	395
220	245	1050	460

Табела 3.3 Подносливи напони за изолаторите кај надземните водови со највисок напон

Номинален напон kV	Највисок напон на опремата, kV (еф. вредност)	Номинален поднослив склопен пренапон, kV (темена вредност)	Номинален поднослив атм. ударен напон, kV (темена вредност)
400	420	950	1050
400	420	950	1175
400	420	1050	1175
400	420	1050	1300
400	420	1050	1425

Во табелите 3.2 и 3.3 фигурираат по повеќе степени на изолацијата за едни исти стандардни вредности на номиналниот напон. Повисоките степени на изолацијата се пригодни и се бираат за мрежи со **изолирана неутрална точка** и мрежи со компензација на струјата на земјоспојот. Кај нас, сите мрежи со висок напон ($U_n \geq 110$ kV) работат со **директно заземјена неутрална точка**. Според тоа, повисоките степени на изолацијата кај овие водови се бираат тогаш кога се очекуваат **интензивни атмосферски празнења** на водот или пак се очекуваат **високи фактори на склопните пренапони**.

Податоците изнесени во табелите 3.1, 3.2 и 3.3 се однесуваат на нормални атмосферски услови (атмосферски притисок **1013,25 mbar**, температура 20°C, влажност 11 gr/m³), и **надморска височина** до 1000 m. За поголеми надморски височини е предвидена зголемена електрична цврстина на изолацијата, т.е. електричната цврстина треба да биде поголема од онаа, дадена во горните табели и тоа за:

- **7,5%** за водови што минуваат низ подрачје со надморска височина од 1000 до 1500 метри,
- **15%** за водови што минуваат низ подрачје со надморска височина од 1500 до 2000 метри,
- **22,5%** за водови што минуваат низ подрачје со надморска височина од 2000 до 2500 метри.

Кај изолаторските синџири, подносливите напони зависат од бројот на членовите во синџирот. Во табелата 3.4 е прикажана зависноста на подносливиот напон на изолаторскиот синџир составен од капести изолатори од типот K120/280 (K3), од бројот на капестите изолатори во синџирот. Табелата 3.4. е презмена од [2].

Табела 3.4 Подносливи напони на изолаторски синџири составени од капести изолатори тип K170/280 (K3) во зависност од бројот на изолатори во низата

Број на елементи во низата	Среден прескочен напон, 50 Hz на суво, kV	Поднослив напон 50 Hz при дожд, kV	Поднослив напон 50 Hz при дожд, kV	50% ударен прескочен напон, kV, со поларитет позитивен	50% ударен прескочен напон, kV, со поларитет негативен	Поднослив ударен напон kV
1	80	55	50	140	146	127
2	150	105	95	230	241	209
3	210	155	141	320	334	291
4	270	200	182	410	428	373
5	330	245	223	500	522	455
6	390	287	261	590	616	536
7	450	329	299	680	710	618
8	505	371	337	770	804	700
9	560	413	375	860	898	782
10	615	455	414	950	993	864
11	670	497	452	1040	1086	946
12	720	539	490	1130	1181	1027
13	770	581	528	1220	1275	1109
14	820	623	566	1310	1369	1191

Доколку во синџирот се употребуваат **заштитни рогови** или **прстени**, тогаш неговиот **прескочен напон се намалува** за околу **30 kV**, додека **подносливиот ударен напон се намалува** за околу **10%**. Затоа е пожелно електричната цврстина на изолаторските синџири, снабдени со заштитна арматура, да се утврдува директно, со лабораториски испитувања.

Во определени случаи (при **премини** над разни патишта, при вкрстосувања со некои објекти и слично), нашите прописи захтеваат и **електрично појачување** на изолацијата. Тоа значи дека на таквите места изолацијата на далекуводот треба да има повисока електрична цврстина во однос на цврстината на изолацијата на останатиот дел од далекуводот. Според нашиот Правилник [1], кај водовите со изолаторски синџири се смета дека изолацијата е електрично засилена доколку во синџирот се стави еден член повеќе, независно од напонското ниво на водот.

Сите услови за електричното и механичкото засилување и димензионирање на изолацијата на далекуводите се прецизно дефинирани во нашиот Правилник за градба на надземни електроенергетски водови.

4 ПРИБОР ЗА СПОЈУВАЊЕ, ОБЕСУВАЊЕ И ЗАШТИТА

Кај далекуводот, гледан како објект во целина, разликуваме:

- електричен дел;
- градежен дел.

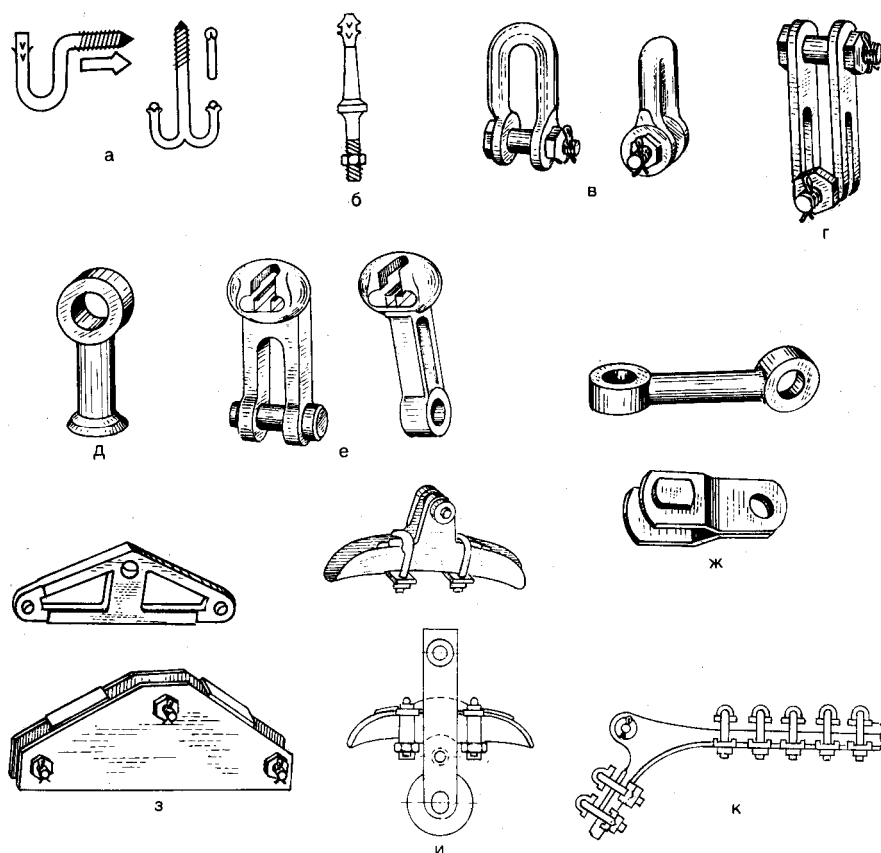
Во градежниот дел спаѓаат **столбовите** и **темелите**, додека во **електричниот** дел спаѓаат спроводниците, изолаторите и спојниот прибор (или таканаречената **арматура**). Приборот, пак, од своја страна се дели на споен, обесувачки и заштитен.

Во принцип, **спојниот прибор** има задача да овозможи премин и несметано течење на електричната струја.

Обесувачкиот прибор има механичка функција и служи за механичко спојување и прицврстување на елементите од далекуводот.

Заштитниот прибор ги има преостанатите функции (механичка и електрична заштита на елементите од далекуводот).

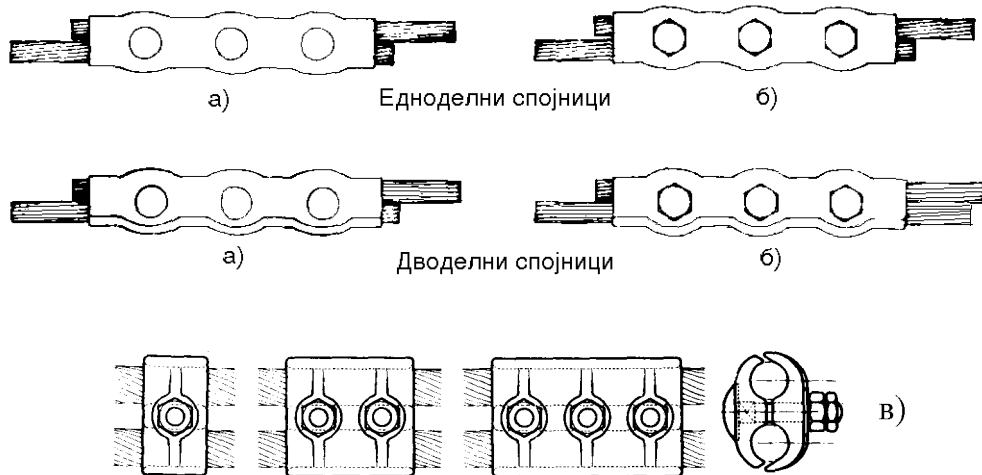
Поедините елементи од приборот често пати имаат **повеќекратна улога**. Така на пример, спојниците можат да имаат **чисто електричка** функција (струјни стегалки), **чисто механичка** функција (наставки, компресиони спојници и друго) или **комбинирана** функција.



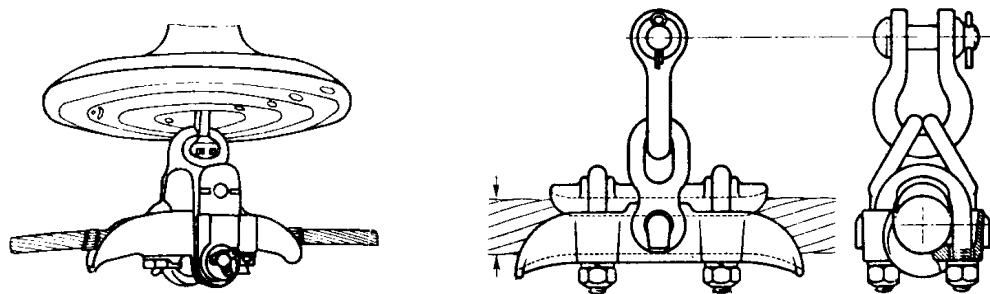
Слика 4.1 Разни елементи од приборот (арматурата)

4.1 СПОЕН ПРИБОР

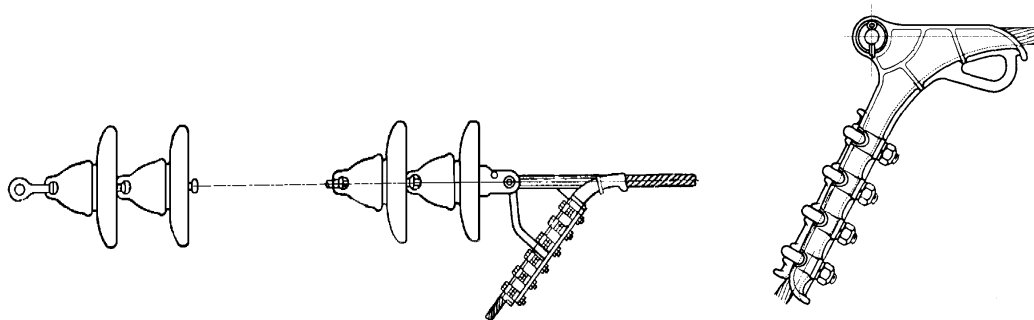
Спојниот прибор се користи за спојување на спроводниците (спој на спроводник со спроводник) и јажињата (спој јаже со јаже). Елементите коишто ја вршат оваа функција се нарекуваат **спојници** или **стегалки** (**клеми**).



**Слика 4.2 Спојници (струјни стегалки)
а) и б) за мали пресеци; в) за големи пресеци**



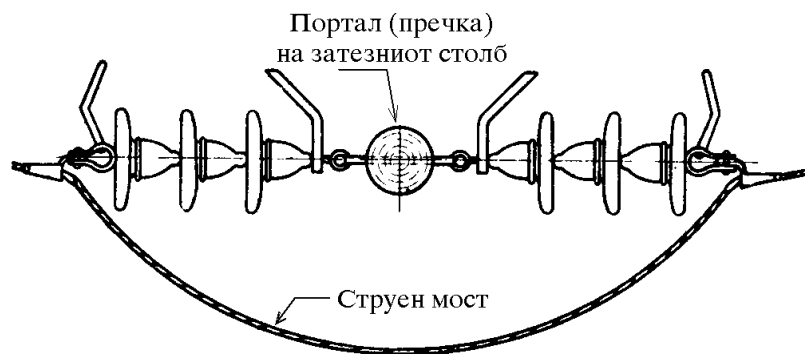
Слика 4.3 Стегалка носечка. Намена и изглед



Слика 4.4 Стегалка затезна. Намена и изглед

Спојниците, односно *стегалките* кои ја вршат таа функција, по правило, треба да бидат **изработени од истиот материјал** од кој се направени спроводниците односно јажињата (алуминиум, дур–алуминиум легура, бакар, челик и друго). Спојниците од челик треба уште и да бидат заштитени од корозија преку поцинкување со жешка постапка, или пак да бидат изработени од челик што не ‘рѓосува. Постојат и **специјални (биметални)** спојници (на пр. Al–Cu спојници). Тие служат за меѓусебно спојување на алуминиумовите и бакарните спроводници со цел да се избегне корозијата, т.е. електролитичкото разорување, кое би настанало при нивен директен галвански контакт.

Спојниците можат да вршат **две улоги**: да обезбедат **само електрична врска** на споените спроводници (струјни стегалки, кои се среќаваат кај т.н. „**струјни мостови**“ (слика 4.5) на затезните столбови, при спојувањето на отцепите на водот итн.), или да воспостават истовремено и **електрична и механичка врска**.



Слика 4.5. Изглед на струјниот мост кај еден 35 kV затезен столб

Во првиот случај, од спојницата се захтева да обезбедува **добар електричен спој**. Во механички поглед се смета дека спојот е доволно добар ако издржува сила на затегање која е над **20%** од силата на кинење на спроводниците.

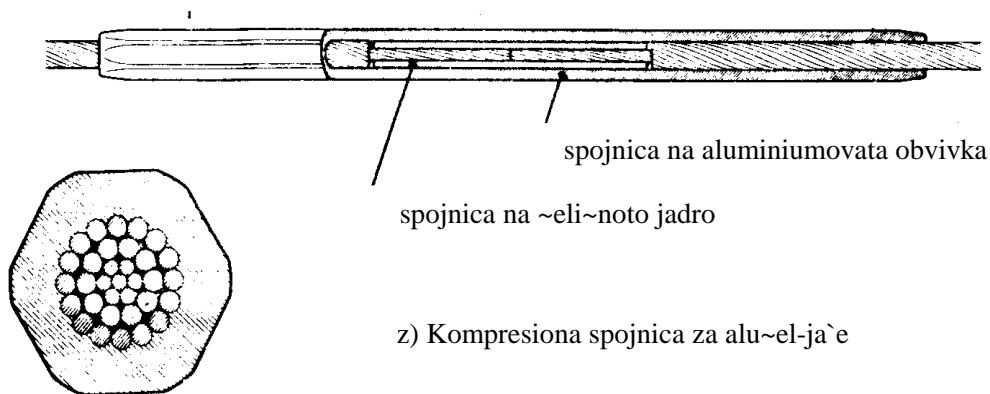
Во вториот случај, врската мора да има **цврстина** како и самиот спроводник бидејќи таа ќе биде механички оптоварена исто како него. Истовремено, таа треба да биде добра и во електрички поглед, т.е. таа треба да обезбеди добар електричен контакт. Спојот на двата спроводника (јажиња) со таква спојница се нарекува **наставка**. Тој мора да издржи во механички поглед сила од најмалку **90%** од силата на кинење на спроводникот односно заштитното јаже.

Од сигурносни причини во еден ист распон не се дозволува изведба на повеќе од една наставка по спроводник односно заштитно јаже. Доколку спојниците со својата конструкција се такви што даваат сигурен спој и гарантираат механичка цврстина од најмалку **100%** од силата на кинење на спроводникот / јажето (на пр. како компресионите спојници), тогаш тие не се сметаат како наставки.

Постојат разни видови спојници. По својата конструкција, тие можат да бидат изведени како едноделни и дводелни. На сликите 4.6...4.8 се прикажани некои од постојните видови спојници.

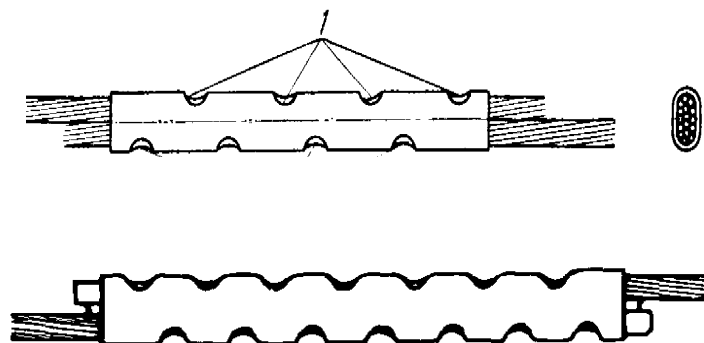
Компресионите спојници служат за наставување на Al/Ѓ јажињата (слика 4.6). Кај нив спојот се остварува со пресување, а самото спојување се врши со хидраулична преса. Спојното место може да има шестоаголна или кружна форма. Шестоаголната форма е подобра затоа што овозможува рамномерно стегање на жиците и подобра електромеханичка врска.

Поради својата висока сигурност во погонот и високиот квалитет на изработката, кај високонапонските водови денес претежно се употребуваат овие спојници. Имаат и недостаток – по изведувањето на спојот, повеќе не можат да се демантираат.

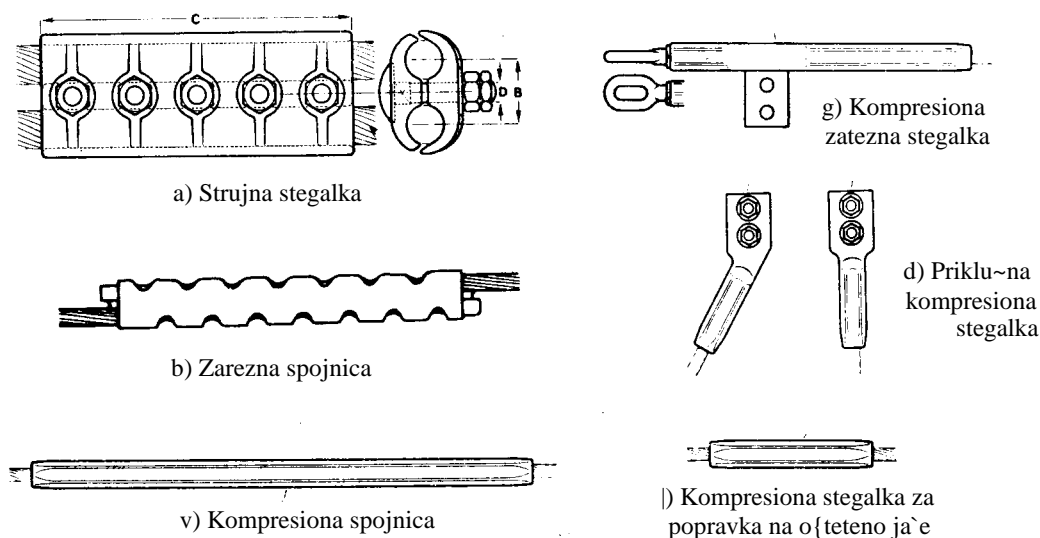


Слика 4.6 Компресиона спојница за комбинирано алучел Al/Џ јаже

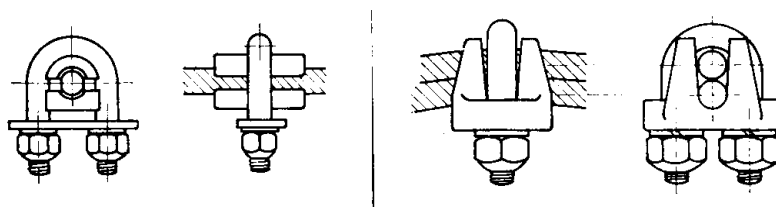
Зарезните спојници (сл. 4.7) се употребуваат претежно кај водовите со низок и среден напон. Тие воглавно служат за наставување на хомогени јажиња на алуминиум, бакар и челик. Самата зарезна спојница претставува елипсоидна цевка од алуминиум, бакар или челик, (зависно од материјалот од кој е изработено јажето), во која се ставаат двата краја на спроводниците што треба да се спојат. Спојувањето на спроводниците се остварува со пресување на спојницата со специјална преса на точно определен начин.



Слика 4.7 Зарезни спојници за хомогено и комбинирано Al/Џ јаже



Слика 4.8 Споен прибор за спроводниците и јажињата кај надземните водови



s) Приклучна (лево) и отцепна стегалка (десно) за нисконапонски вод

Слика 4.9 Споен прибор за спроводниците и јажињата кај НН надземни водови

Приклучните стегалки (слика 4.8.г) и отцепните стегалки (слика 4.8.д) се применуваат само кај спроводниците со помал пресек (до 35 mm²) и кај пониските напони (сл. 4.9).

Струјните стегалки (слика 4.8.а) претставуваат спојници со кои треба да се оствари добра електрична врска помеѓу два спроводника. Тие не смеат да бидат механички оптоварени. За секој пресек на спроводниците треба да се употреби соодветна струјна стегалка.

4.2 ПРИБОР ЗА ОБЕСУВАЊЕ

Под *прибор за обесување* се подразбираат сите елементи што служат за:

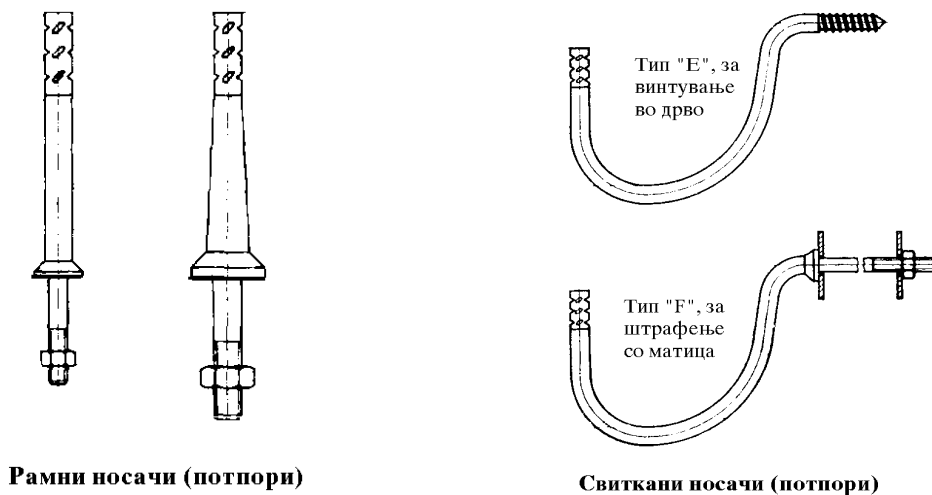
- обесување, прицврстување и затегање на спроводниците и јажињата;
- прицврстување на спроводниците во сноп;
- в) механичко спојување на спроводниците со изолаторите;
- г) спојување на изолатор со изолатор;
- спојување на изолатор со столбот (конзолата).

Приборот за обесување во голема мера влијае на погонската сигурност на целиот вод. Затоа, тој треба да има определени механички и електрични карактеристики како и висок квалитет во изработката, а монтажата треба да му биде брза, лесна и едноставна. Елементите од приборот се изработуваат од **челик**, односно **темпер лив**. Приборот, вклучувајќи ги тука и навртките и завртките, мора да биде **поцинкуван**. Тој исто така треба да биде лесен, да има голема механичка цврстина и не смее да предизвикува корозија на спроводниците и нивно електролитско разорување.

Основни елементи на приборот за обесување/прицврстување се:

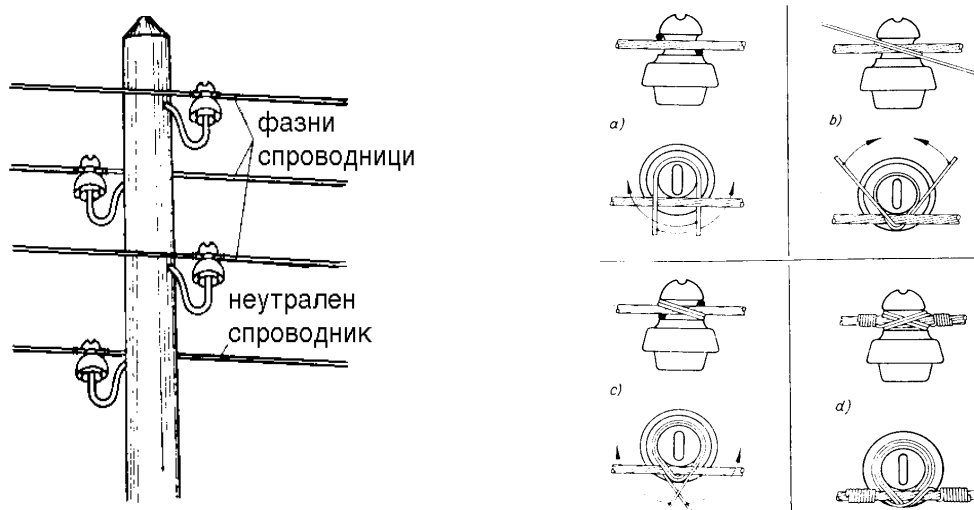
- а) **потпори** за потпорните (свонестите) изолатори;
- б) носечки односно затезни **стегалки**;
- в) **растојници** за спроводниците во сноп;
- г) **помошен прибор** за формирање на изолаторските синцири.

Потпорите (носачите) за потпорните изолатори (слика 4.10) служат за прицврстување на потпорните изолатори на дрвените столбови (свиткани потпори), односно на конзолите и челичните конструкции кај другите врсти столбови (рамни потпори). Тие се изработуваат од челик со кружен пресек и се заштитени од корозија со поцинкување (ретко со премачкување со мрсна боја или катран).



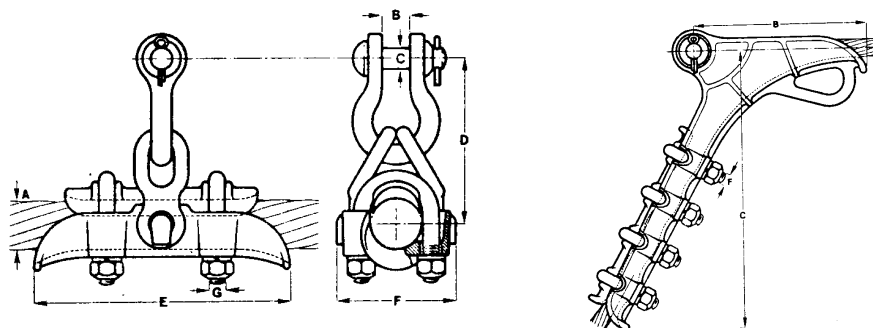
Слика 4.10.а Потпори (носачи). Рамни (лево) и свиткани (десно)

Потпорните изолатори се прицврстуваат на челичните потпори на разни начини. Најчесто, на винтот од потпората, претходно обмотан со импрегнирана кучина или југена трака, се навртува самиот изолатор. Понекогаш, прицврстувањето се врши фабрички од страна на самиот производител на арматурата, со помош на олово, или специјални нерастегливи китови на база на цемент или полиестерски смоли. Спроводникот се прицврстува за потпорниот изолатор со превзување со мека жица од алуминиум односно бакар (слика 4.11), или пак со помош на специјални клеми за прицврстување.

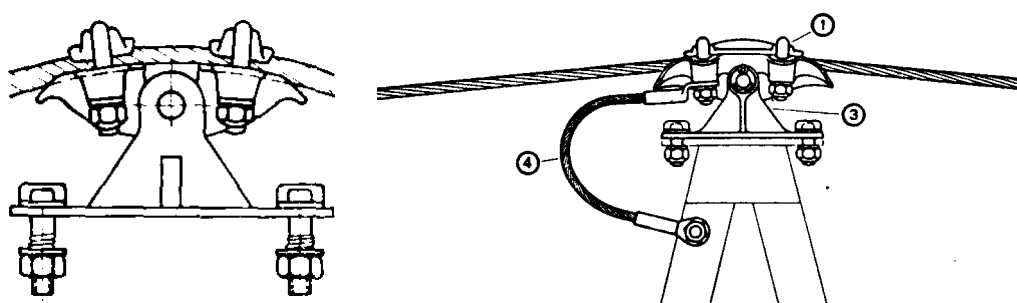


Слика 4.11 Зацврстување на спроводниците за изолаторите со помош на сврзна жица

Прицврстувањето на спроводниците за изолаторските синџири се врши со таканаречените *стегалки*, кои ги има два вида: *носечки* и *затезни* (слика 4.12). Тие се најосетливиот дел од обесувачкиот прибор на далекуводите. Стегалката, како задебелување на спроводникот, претставува јазел на сите *свиткувања* и *вибрации* па со текот на времето на тоа место доаѓа постепено *оштетување* и *кинење* на спроводникот заради *замор на материјалот*. Опасноста од оваа појава се ублажува со примена на добро обликувани подвижни стегалки кои се еластично прицврстени за изолаторскиот синџир.



Слика 4.12 Стегалки за спроводниците и јажињата: носечка (лево) и затезна (десно)



Слика 4.13 Стегалка за заштитно јаже

Стегалките се прават од **поцинкуван челик**, од челик што не ‘рѓосува или пак од разни **легури на алуминиумот**. За јажињата од алучел како и за јажињата од алуминиум погодно е да се применуваат стегалки од легури на база на алуминиумот. Таквите стегалки се нарекуваат уште и **антимагнетски**, а се употребуваат тогаш кога се сака да се смалат загубите поради вртложните струи.

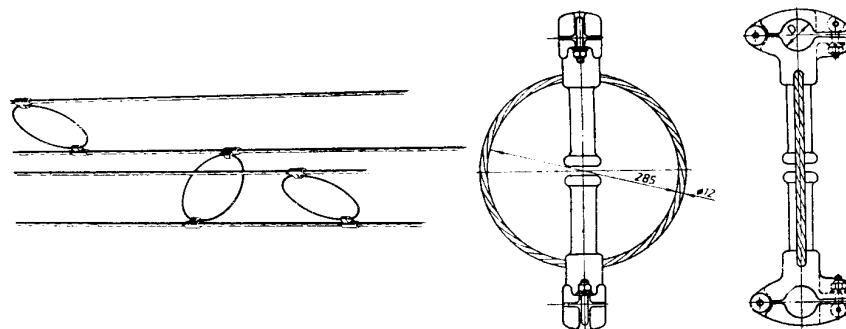
Носечката стегалка го прицврстува спроводникот за носечкиот изолаторски синцир (т.е. посредно, за столбот). Постојат **цврсти (крути)** стегалки (стегалки кај кои спроводникот е фиксно прицврстен и воопшто не може да се лизга), **подвижни** стегалки и **искокнувачки носечки стегалки**. Наједноставна и најевтина е цврстата стегалка. И покрај тоа, заради намалување на заморот на материјалот од спроводниците под дејство на еолските вибрации, најчесто се применуваат подвижните стегалки.

Кај **подвижните носечки стегалки** стегалката заедно со спроводникот може да се врти околу една оска и на тој начин да зазема разни положби во однос на оската на висечкиот изолаторски синцир. Освен тоа, спроводникот во носечката стегалка не е фиксно прицврстен и при дејствување на голема еднострана сила, може да дојде до **лизгање и делумно извлекување** на спроводникот од стегалката.

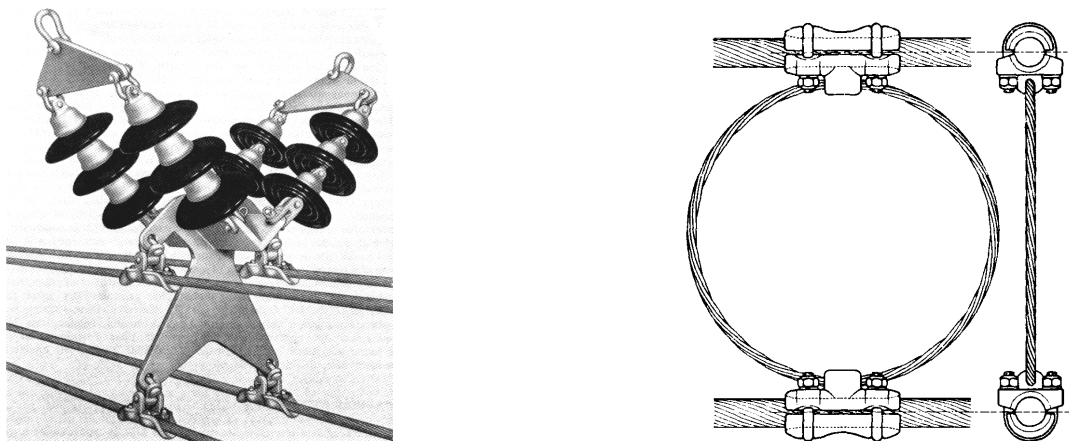
Овие особини на подвижните стегалки се добродојдени во случаите кога настануваат хаварии кај кои доаѓа до прекин на еден или повеќе спроводници/јажиња. При кинење на спроводникот во распонот, сета сила на затегањето од едната страна на распонот ја прима врз себе носечкиот столб за што тој не е предвиден. Со отклонот на носечкиот изолаторски синцир од вертикалната положба и со делумното извлекување на спроводникот од носечката стегалка, силата на затегање се намалува а со тоа се намалува и едностраното механичко преоптоварување на столбот. **Силата на извлекувањето** кај носечките стегалки за спроводниците односно заштитните јажиња не смее да биде помала од **60%** од силата на затегањето.

Доколку се сака да се избегне димензионирањето на столбовите за случаите што настануваат при прекин на спроводниците и заштитните јажиња, се употребуваат т.н. **искокнувачки стегалки**. Кај нив, кога изолаторскиот синцир ќе достигне определен **агол** на отклон од вертикалата во правец на трасата од водот поради прекин на спроводникот од едната страна на распонот, доаѓа до **отпуштање и искокнување** на спроводникот од стегалката, и со тоа носечкиот столб механички се растоварува од силата на затегањето.

Стегалките и другите метални делови во составот на изолаторските синцири како и опремата за прицврстување на заштитното јаже за врвот на столбот, мораат да бидат димензионирани така што ќе издржат механички напрегања кои се за најмалку **2,5** пати поголеми од силата на кинење на спроводникот односно јажето.



Слика 4.14.а Спроводници во сноп и растојници за спроводниците во снопот

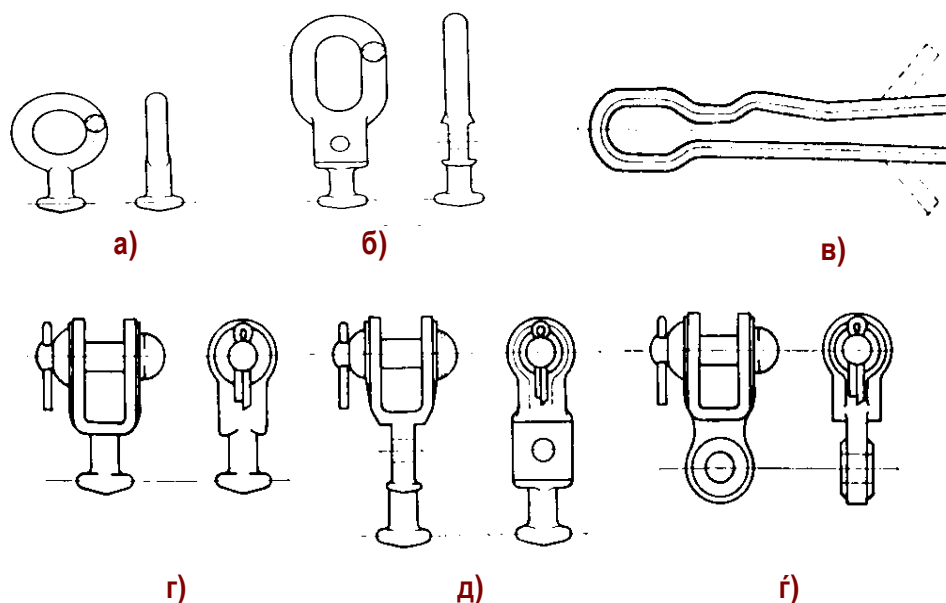


Слика 4.14.б Изглед на фиксен и еластичен растојник

Меѓусебното растојание и положбата на спроводниците во снопот го обезбедуваат растојниците. Тие се поставуваат по должината распонот на секои **35–50 m**. Обично имаат кружен облик (види слика 4.14а и слика 4.14б) и се еластични.

Останатиот **прибор за спојување и обесување** (завртки, ушици или обетки, карики, вилици, куки и друго), се употребува за прицврстување на изолаторските синџири за столбовите и за изведување на зглобно-продолжните врски коишто повеќекратно се повторуваат при формирањето на самите изолаторски синџири (слика 4.16).

Секоја **зглобна врска** „гнездо–толчник“ (односно „капа–толчник“) во изолаторскиот синџир, како и останатите врски (вилаца–гнездо, толчник–стегалка и друго) се осигуруваат со **осигурувачи** (шпленти). Изгледот на поважните елементи од приборот за обесување е прикажан на сликата 4.15, а нивните функции можат да се видат во приложените примери на сликите 4.11 ... 4.13.



Слика 4.15 Обесувачки прибор за изолаторските синџири: ушици, карики, вилици и осигурувачи

**а) Ушица (обетка) со толчник; б) Карика со толчник; в) Осигурувач
г) и д) Вилица со толчник; е) Вилица со ушица свртена**

Елементите од обесувачкиот прибор се изработуваат од **кован челик**, **темпер лив** (заштитени од корозија со топло поцинкување) или пак од **лиен алуминиум** односно алуминиумови легури. Од економски причини, челиците што не ‘рѓосуваат се употребуваат поретко.

Во последно време, во многу земји поправките на надземните водови од сите напонски нивоа се вршат без исклучување од погонот, т.е. работите се изведуваат **под напон**. Основни методи за таа цел се **американско-шведскиот** (работникот е на потенцијал на земјата) и **рускиот** (работникот е на потенцијал на спроводникот). Обата метода подеднакво успешно се применуваат во многу земји и тие дури станале нормален начин на работење.

Без оглед на применетиот работен метод, од голема важност е изолаторскиот синџир **лесно да се составува и разглобува**. Тоа поставува нови барања во поглед на приборот, и ним може да им се удоволи на два начина: или со **прецизна изработка** на димензиите и степенот на обработка на металните делови, или пак со конструирање на нови, **специјални врсти споен и обесувачки прибор**, прилагоден за работа под напон.

4.3 ЗАШТИТЕН ПРИБОР

Кај надземните водови постојат два вида заштитен прибор: **електрички** и **механички**. Електричкиот заштитен прибор го сочинуваат: **заштитните јажиња**, **земјоводите**, **заштитните рогови** и **прстени**, **заземјувачите**, **искриштата** и **одводниците на пренапони**. Во механичкиот заштитен прибор спаѓаат: **придушувачите на вибрации** (антивибраторите) и **теговите**.

Заштитното јаже се поставува над фазните спроводници и ги штити од директните атмосферски празнења. Се прицврстува со стегалки на врвот од столбовите (сл. 4.13). Во механички поглед се пресметува како и фазните спроводници. Заштитното јаже на челично-решеткастите столбови **е поврзано со заземјувачот** преку самата конструкција на столбот. Над темелот треба да постои **стегалка за приклучок** на заземјувачот. Кај армирано-бетонските столбови, заштитното јаже е поврзано со заземјувачот преку челичната арматура во бетонот. За таа цел, арматурата треба да биде заварена со што се обезбедува сигурен електричен контакт. Дрвените столбови се заземјуваат само ако носат заштитно јаже или ако треба да се заземјат металните делови на столбот (носачи, конзоли).

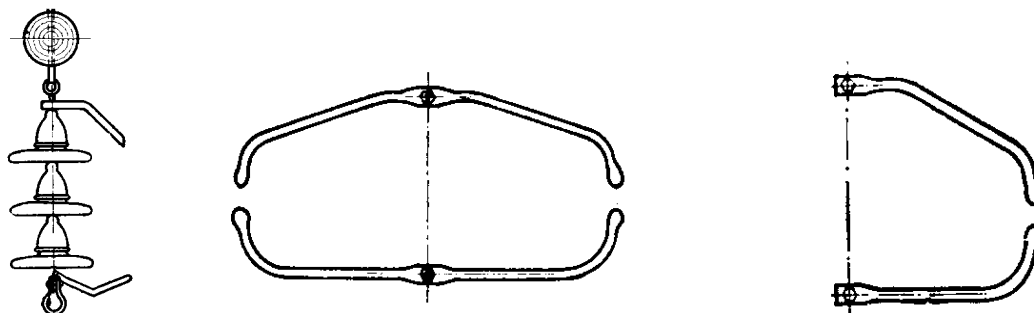
Земјоводите служат за спојување на заштитното јаже односно металните делови од столбот со заземјувачот. Тие се изведуваат во форма на **жици** или **ленти**, а се прават најчесто од поцинкувано железо, бакар или алуминиум.

Заземјувачите се поставуваат во земјата, околу темелите на столбовите. Тие имаат задача, при атмосферските празнења струјата на молњата да ја одведат во земја. Исто така, при појави на еднофазни куси врски односно земни споеви на далекуводите, низ нив се одведува струјата на грешка во земјата. Заземјувачите се прават најчесто од челични **поцинкувани ленти** или челични **поцинкувани цевки**. Често се прават и од поцинкувано валчесто железо. Во хемиски агресивните почви, тие се изведуваат обично од **бакарни јажиња**.

На сигурноста на работата на водовите за висок и највисок напон, во голема мерка влијаат атмосферските празнења кои можат да предизвикаат **прескок** долж изолаторскиот синџир. **Електричниот лак** што се воспоставува на местото на прескокот во тие прилики може да ги оштети изолаторите па дури и самиот спроводник, што

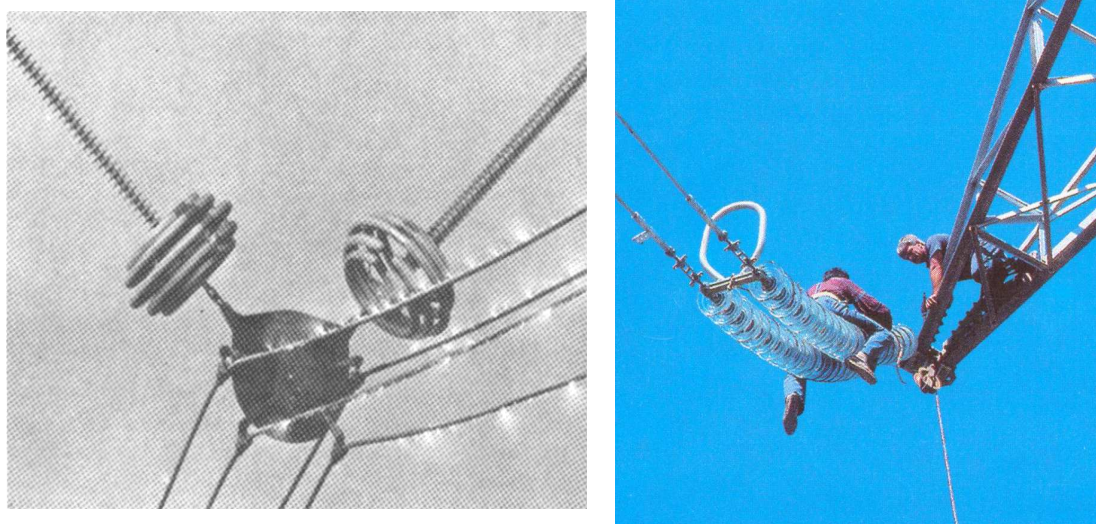
претставува крајно непожелна појава, бидејќи тоа обично доведува до исклучување на водот од погонот поради негова поправка и штети поради прекилот во работата. Затоа, изолаторските синџири се штитат од електричниот лак со *заштитни рогови* (сл. 4.16а или *заштитни прстени* (сл. 4.16.б) кои настанатиот електричен лак го отстрануваат од површината на изолаторите.

Овој вид заштита од електричен лак се применува само кај поважните високонапонски водови, и тоа во мрежите со директно заземјена неутрална точка. Во прв ред за таа цел се користат *заштитните рогови* (слика 4.8.а) и тоа обично по четири рога за секој носив изолаторски синџир, и по два рога за секој затезен изолаторски синџир.



Слика 4.16.а Заштитни рогови за носечки (средина) за затезни изолаторски синџири (десно)

Кај водовите со висок и највисок напон, најефикасна заштита се постигнува со употреба на *заштитни прстени* (сл. 4.16б) (горе и долу) или со употребата на рогови кои имаат специјален облик, но често се користи и мешовит тип заштита (горе рогови-долу прстен).



Слика 4.16.б Заштитни прстени: прстени кај 750 kV изолатори (лево); монтажа на заштитни прстени на 400 kV изолаторски синџир (десно)

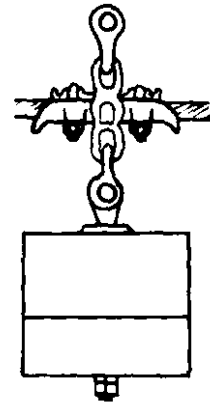
Заштитните прстени се погодни за заштита на водовите со највисок напон бидејќи тие истовремено вршат *регулација на електричното поле*, т.е електричното поле по должината на изолаторската верига го прават да биде повоедначено, па разликата на потенцијалите на краевите од изолаторскиот синџир се *распределува поеднообразно* по поедините изолаторски членови во синџирот.

Теговите се елементи на механичкиот заштитен прибор. Служат за **вештачко зголемување на вертикалната компонента на силата** со која спроводниците делуваат врз носечките столбови. Се изработуваат најчесто од **бетон**, а поретко од **лиено железо** или од **олово**.

Теговите се поставуваат кај носечките столбови кај кои силата од спроводниците има **недоволно голема** или пак има дури и **негативна** (насочена нагоре) **вертикална компонента**.

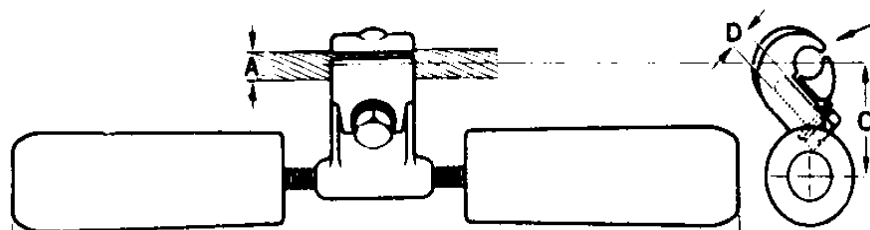
Тоа се прави со цел да се **искомпензира компонентата** на силата насочена **нагоре** која се јавува при минималните температури. Исто така, кога **отклонот** на изолаторските синџири под дејство на бочните сили со кои ветрот дејствува врз спроводниците **е преголем** и постои можност спроводниците опасно да се **доближат** до заземјените конструкции на носечките столбови, теговите помагаат да се **намали аголот на отклон** и споменатата опасност да се отстрани.

Теговите се закачуваат за долниот крај од носечките стегалки, како што е тоа прикажано на сл. 4.17.

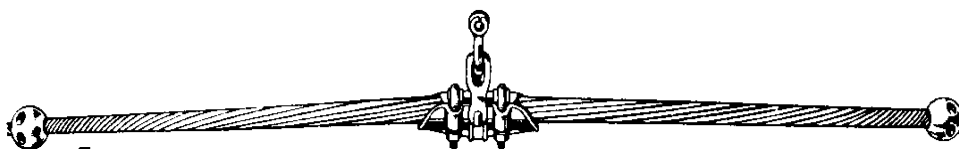


Слика 4.17. Изглед на тегови кај далекуводите

Придушувачите на вибрации или таканаречените **антивибратори**, служат за заштита на спроводниците од штетното дејство на вибрациите што ги создава ветрот. Под дејство на ветрот, кој предизвикува вибрации при определена брзина, (види глава 7) доаѓа до осцилирање на спроводниците со фреквенција од неколку десетини херци. Овие осцилации со текот на времето предизвикуваат замор на материјалот и тоа првенствено во близината на носечките стегалки (поретко кај затезните стегалки). За да се сузбие или ублажи оваа појава, се користат антивибраторите. За таа цел на располагање стои голем број разновидни антивибратори, но кај нас главно се употребуваат придушувачите од типот „стокбриџ“ (**Stockbridge**) (сл. 4.10) и придушувачите во форма на биконусни прачки (**Armor rods**) (сл. 4.11).

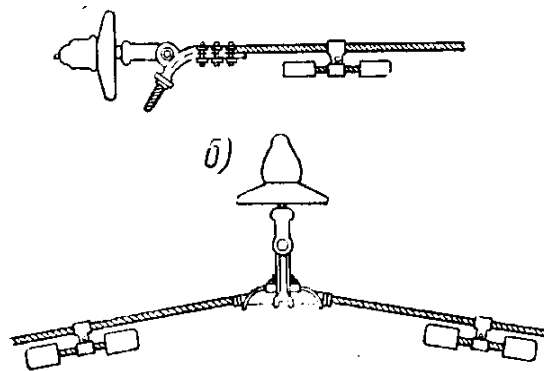


Слика 4.18 Придушувачи од типот Stockbridge



Слика 4.19 Придушувачи од типот Armor rods

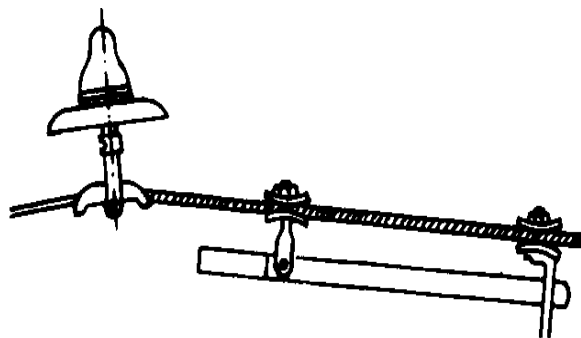
Придушувачите од типот „Stockbridge“ осцилираат поинаку од спроводниците, со друга фреквенција. На тој начин тие ги апсорбираат (придушваат) настанатите вибрации и го оневозможуваат нивното простирање долж спроводникот. За распоните до 300 m обично се употребуваат по два придушувача во секој распон, по еден придушувач од секоја страна на носечката стегалка, поставени на точно определено растојание од неа (сл. 4.20). Кај поголемите распони, особено оние кај кои можат да настанат големи вибрации, неопходно е да се поставуваат по 4, па и повеќе придушувачи во секој распон.



Слика 4.20 Придушувач од типот Stockbridge поставен во близината на затезна и на носечка стегалка

Друг вид придушувачи на вибрациите што често се користи се **биконусните прачки** (тип Armo rods од сликата 4.19). Овој вид придушувачи всушност претставува **сноп** од десет или повеќе еднакви прачки од алуминиум, на кои, гледано од средината спрема краевите, постепено им се намалува нивниот пречник. Тие на определен начин се обмотуваат околу спроводникот на местото каде што ќе биде поставена носечката стегалка. На тој начин спроводникот механички се појачува, се зголемува неговиот момент на инерција а силата на совивање, што се јавува при осцилациите, се распределува на поголем пресек. Во исто време, овие антивибратори служат и како заштита на спроводниците од оштетување (нагорување) при појава на електричен лак.

Постојат и т.н. „стапести“ придушувачи на вибрации (сл. 4.21). Во денешно време ретко се применуваат.



Слика 4.21 Стапест придушувач (антивибратор)

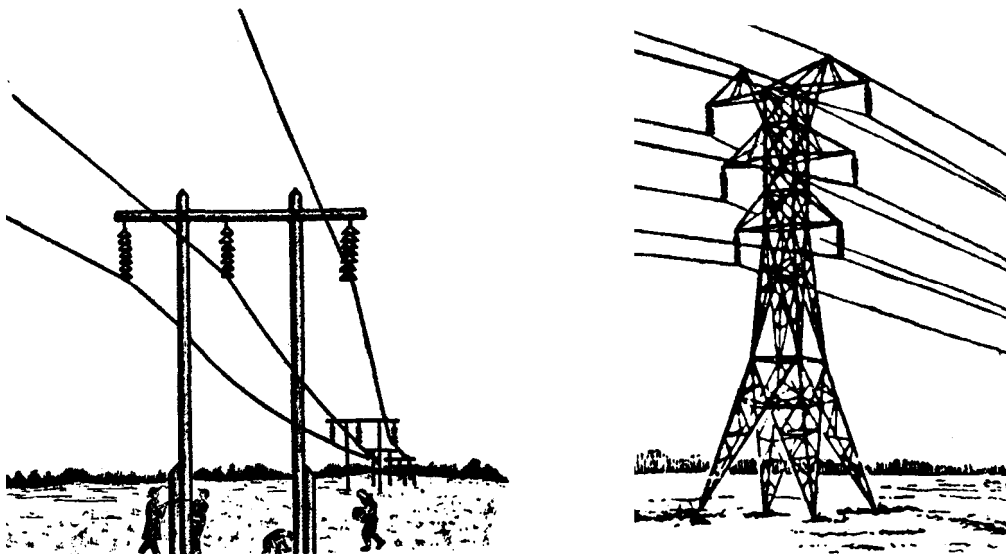
5 СТОЛБОВИ ЗА НАДЗЕМНИТЕ ВОДОВИ

5.1 ЗАДАЧА, НАМЕНА И ВРСТИ НА ЕЛЕКТРИЧНИ СТОЛБОВИ

Електричните столбови се наменети да ги носат спроводниците од далекуводите (се разбира изолирано, преку електричните изолатори), држејќи ги притоа на определено меѓусебно растојание и на определена височина над земјата. Заради безбедноста на луѓето и животните што доаѓаат во близината на далекуводите, овие растојанија се стриктно дефинирани со Правилникот [1].

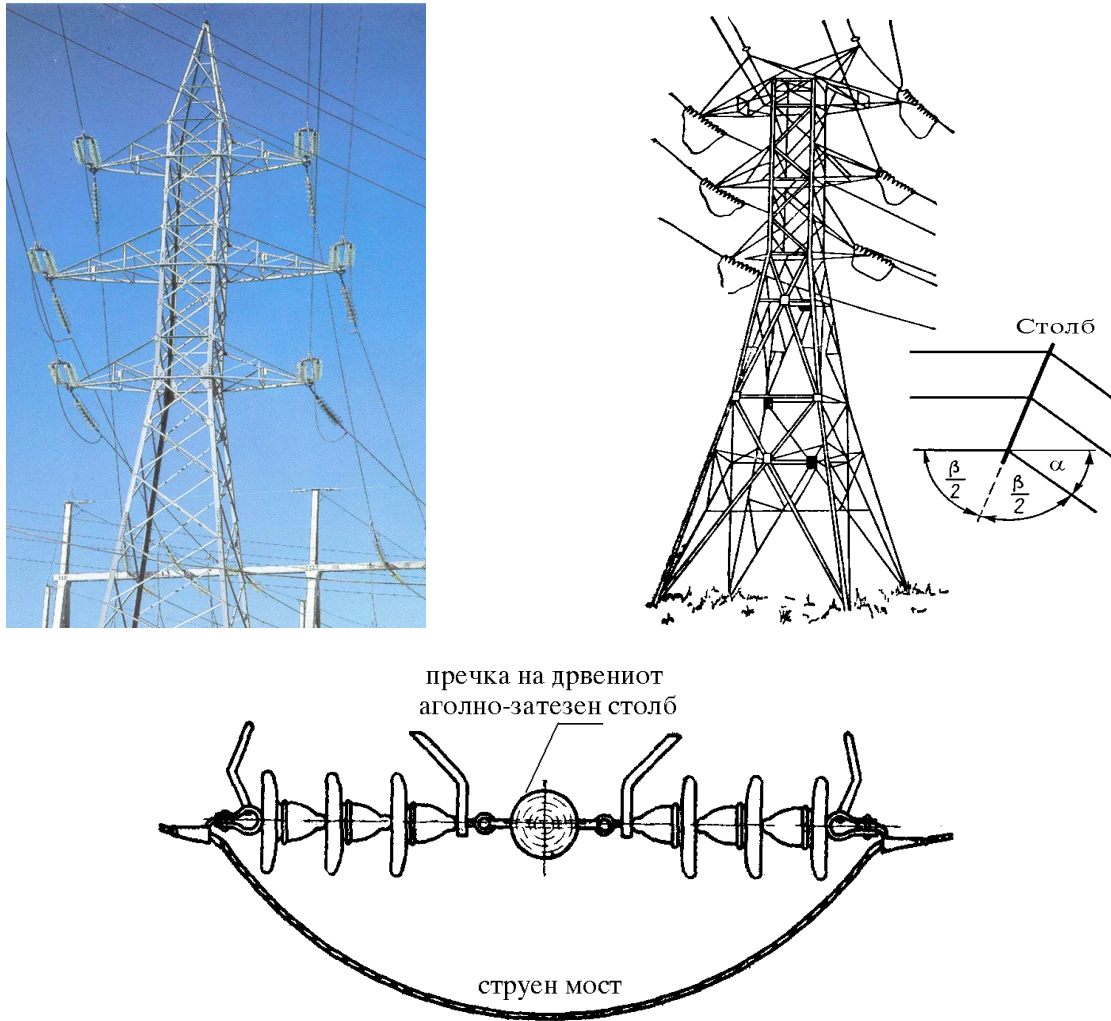
Столбовите се поставуваат на отворен простор. Тие минуваат низ предели со разни теренски, климатски и атмосферски услови. Затоа, тие треба да се градат така што ќе ги издржат сите надворешни сили и атмосферски влијанија што дејствуваат врз нив и се стремат да ги свиткаат, превртат или на било каков начин да ги оштетат.

Според начинот на прицврстување на спроводниците и својата намена, столбовите се делат на носечки и затезни. Носечките столбови служат за носење на спроводниците и заштитните јажиња, додека затезните столбови служат за затегање на спроводниците и јажињата. Кај носечките столбови изолаторските синцири имаат вертикална положба (слики 5.1.a и сл. 5.4.a), додека кај затезните столбови изолаторските синцири имаат практично хоризонтална положба (слика 5.1.b и слика 5.4.b)).

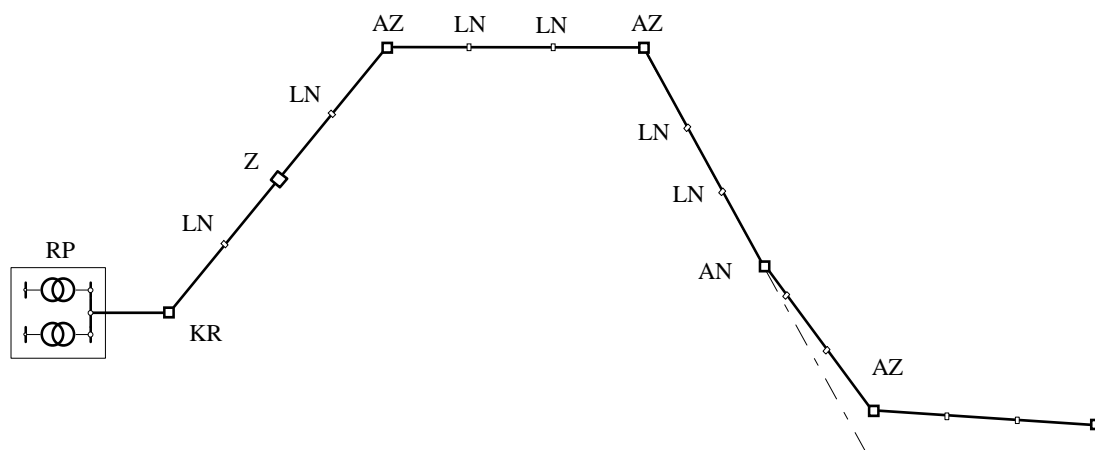


Слика 5.1.a Носечки столбови за 110 kV напон

Според својата положба во трасата на водот, столбовите се делат на линиски и аголни. Линиските столбови се поставуваат во праволинискиот дел од трасата, но понекогаш кај нив се дозволени и мали скршнувања на трасата. Аголните столбови, пак, по правило, се поставуваат на местата каде што трасата од водот го менува својот правец, но тие може да се постават и во праволинискиот дел од трасата. Значи, носечките столбови можат да бидат линиски или аголни, зависно од големината на аголот на свртување на трасата. Слично и затезните столбови, зависно од тоа на кој дел од трасата се наоѓаат, можат да бидат линиски и аголни.



Слика 5.1.6 Аголно-затезен (АЗ) столб (горе) и изолаторски синџири кај АЗ-столб



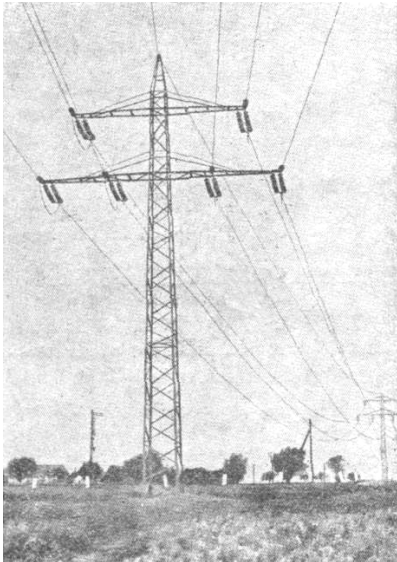
Слика 5.1.в Траса од далекувод со различни видови столбови

Легенда: РП—разводна постројка; КР—краен столб; ЛН—линиски носечки столб; З—затезен столб; АЗ—аголно затезен столб; АН—аголен носечни столб.

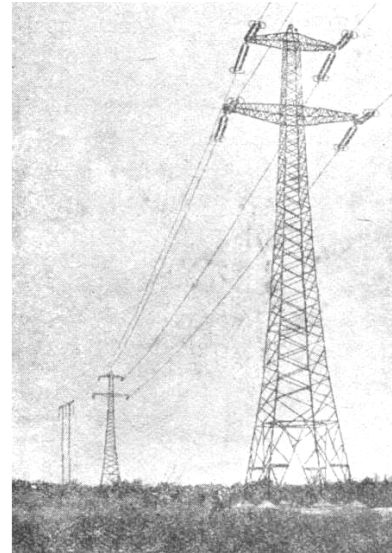
Линиските носечки столбови во просек ги има 80 – 90% од вкупниот број на столбовите на далекуводот. Најголемото можно свртување на трасата кај овие столбови е до 9°. Затоа тие имаат едноставна конструкција и се поевтини од другите видови столбови. За поголеми агли на свртување на трасата, се користат аголните столбови.

Аголните столбови служат за промена на правецот на трасата од далекуводот. Доколку аголот на свртување е до 20°, тие може да се изработуваат и како носечки. За поголеми агли на свртување, се изработуваат како затезни и тогаш се нарекуваат *аголно–затезни (АЗ) столбови* (слика 5.1г).

Освен споменатите видови столбови, постојат и други, *специјални врсти столбови*. Тука, на пример, се вбројуваат *преодните столбови*, столбовите за *вкрстосување*, *крајните столбови* и други. Преодните столбови претставуваат специјална врста столбови кои имаат зголемена височина и зголемена механичка сигурност. Најчесто се изведуваат како затезни и се користат за совладување на разни природни препреки (премини преку големи реки, провалии и друго), и при вкрстосување со разни видови пресечни објекти како на пример патишта, железнички пруги, при вкрстосување со други електроенергетски или телекомуникациони (ТК) водови итн.



Слика 5.1.г АЗ-столб од еден 220 kV далекувод

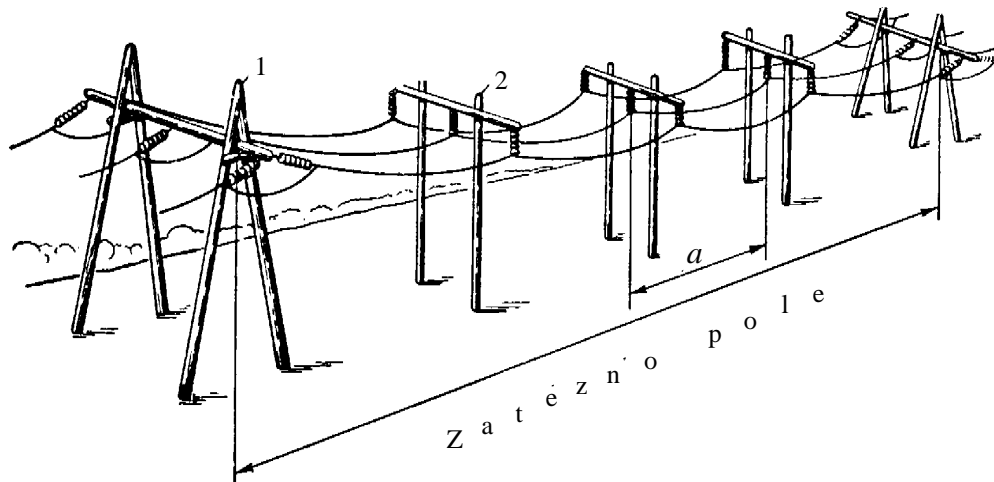


Слика 5.1.б Специјален столб за вкрстосување

На почетокот и на крајот од секој надземен вод, на приодот (влезот) во разводните постројки, се поставува по еден специјален столб во затезна изведба. Кај овие столбови силата на затегање на спроводниците дејствува само од едната нивна страна (од страна на далекуводот) и затоа тие имаат улога на растеретни столбови, а се нарекуваат *крајни* или *крајни–растеретни* столбови.

Делот од водот помеѓу два затезни столба се нарекува *затезно поле* (сл. 5.2). Столбовите во едно затезно поле практично се поставени во права линија, без никакви, или со сосем мали скршнувања на линијата на трасата. Во нормални околности се настојува, ако тоа не го спречуваат природните препреки, затезното поле да биде што е можно подолго. Тоа се прави со цел да се зголеми процентуалната застапеност на носечките линиски столбови, бидејќи тие се значително поевтини од аголните и затезните столбови. Меѓутоа од сигурности причини должината на едно затезно поле е сепак ограничена, бидејќи кај потешките хаварии, пропратени со рушење на столбовите, локалните дефекти и оштетувања настанати во едно затезно поле (ЗП) не се

пренесуваат на соседните затезни полиња. Затоа, со цел да се зголеми погонската сигурност на далекуводот, во подрачјата со тешки теренски и климатски услови треба да се настојува затезните полиња да бидат покуси. Според правилникот [1], должината на едно затезно поле не смее да биде поголема од 8 километри ниту пак затезното поле смее да опфаќа повеќе од 30 распони.



**Слика 5.2 Затезно поле од далекувод изведен со дрвени портални столбови
1) затезен столб; 2) носечки столб**

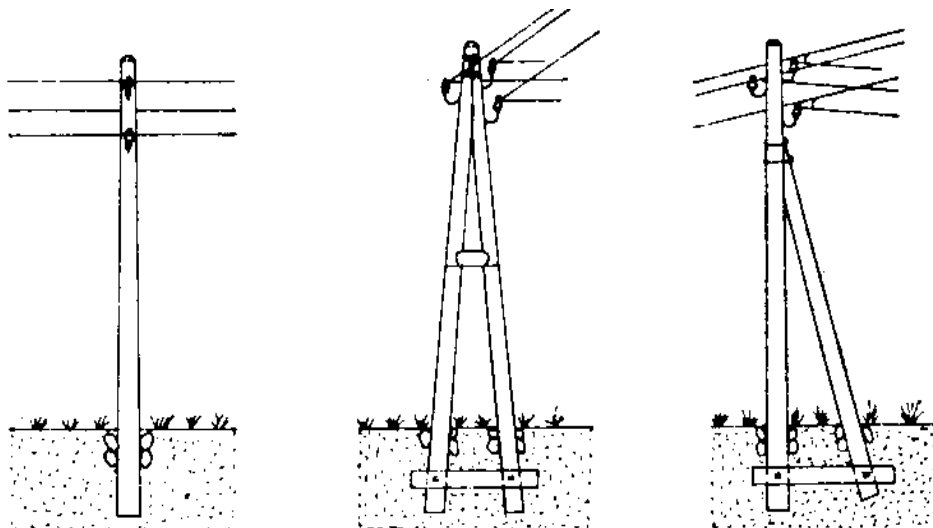
5.2 ПОДЕЛБА НА СТОЛБОВИТЕ СПОРЕД МАТЕРИЈАЛОТ ОД КОЈШТО СЕ ИЗРАБОТЕНИ

Зависно од материјалот од кој што се изработени, столбовите можат да бидат:

- дрвени;
- железни (челично–решеткасти);
- армирано–бетонски;
- алуминиумски;
- полиестерски;
- и др.

5.2.1 Дрвени столбови

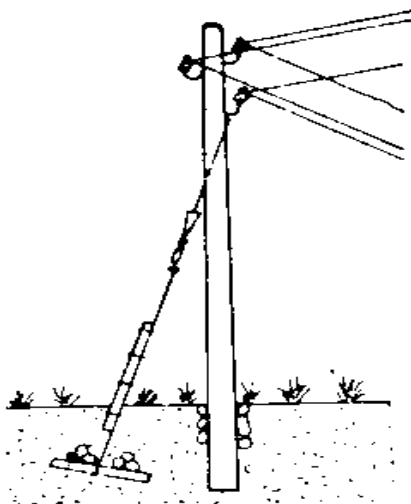
Дрвените столбови (слики 5.3 и 5.4) најчесто се користат за водови со номинален напон до 35 kV и за распони до 150 m, макар што во некои земји, богати со дрво (на пример СССР, Канада, САД и др.) се користат и за повисоки напони (110 kV, 220 kV, 345 kV). Тие лесно се обработуваат и монтираат, а освен тоа тие имаат многу голема електрична цврстина, па често се користат за градба на водови што минуваат низ подрачја со голем број атмосферски празнења. Се изработуваат обично од *бор*, *елка*, *смрека*, *костен* и *багрем*, а поедини нивни делови (ногари, пречки и друго) можат да се изработуваат уште и од *даб*.



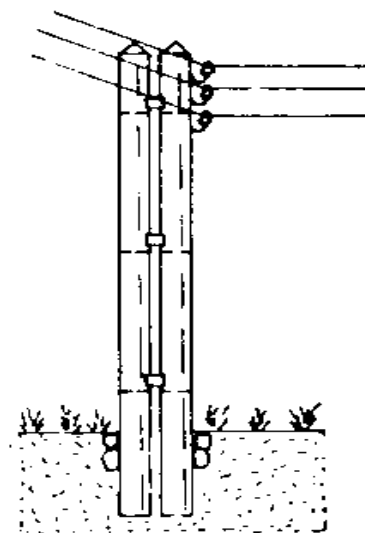
а) Носечки

б) А-столб

в) Потпрен



г) Усидрен



д) Двоен (со 2 јарбола)

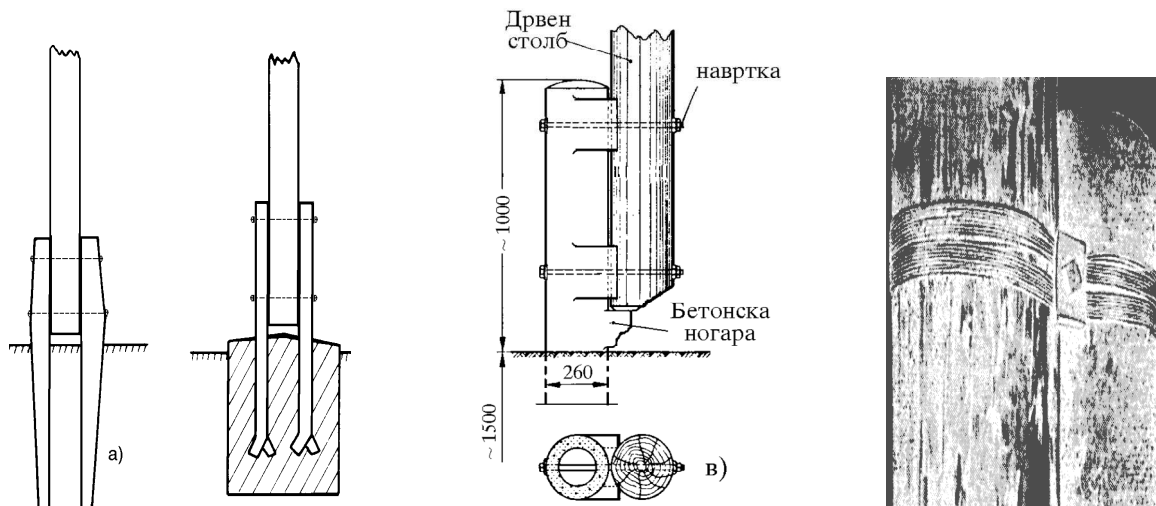
Слика 5.3. Дрвени столбови за низок напон

Дрвените столбови се подложни на **трулење**, особено на местото каде што дрвото излегува од земјата. Поради тоа, столбовите, освен оние коишто се отпорни на трулење, (на пример столбовите изработени од костен, багрем и др.) мораат да бидат **импрегнирани**, така што нивниот век на траење ќе изнесува **20** па и повеќе години. За да се спречи трулењето на столбовите на местото на излегување од земјата, често се употребуваат ногари од **квалитетно дрво** (сл. 5.5а), бетон или челик, а столбовите се поставуваат на ногарите така што воопшто да не ја допираат земјата (сл. 5.4).

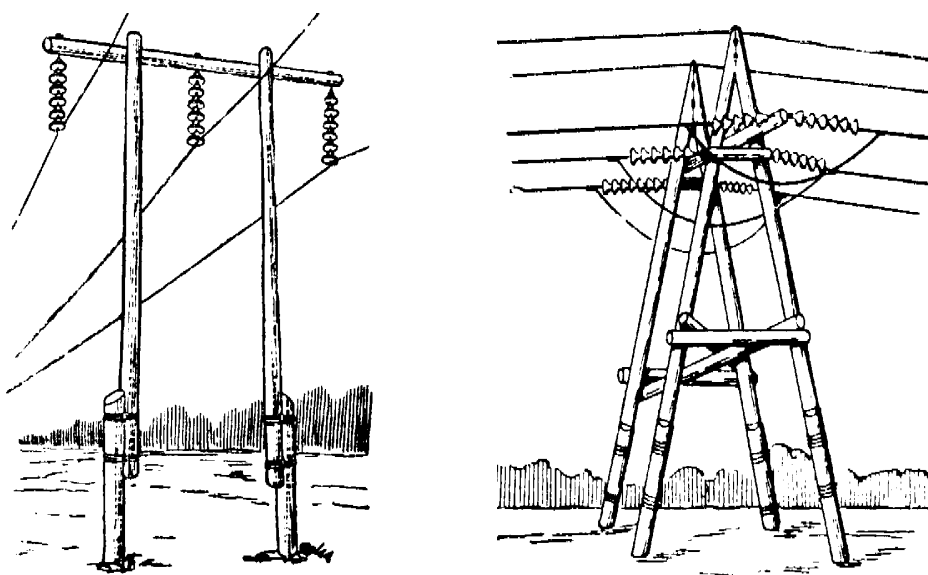
Во поглед на изолацијата, **дрвото** има голема електрична цврстина (**пробоен напон од сса 300 kV/m**). Поради тоа, кај дрвените столбови не се врши **заземјување**, односно не се поставува заштитно јаже, доколку за тоа нема некое посебно барање. Исто така, на изолаторите односно изолаторските синцири, не се поставуваат заштитни рогови. Доколку на дрвениот столб се води заштитно јаже, тогаш кај секој столб се изведува

заземјување, а на столбовите се поставуваат **земјоводи** (обично од челични поцинкувани ленти) со помош на кои јажето галвански се спојува за заземјувачот.

Далекуводите со дрвени столбови можат да бидат **едносистемски** и **двосистемски**, а изгледот на столбовите може да биде различен (обични столбови, портални столбови, А-столбови и др.)



Слика 5.4 Ногари за дрвени столбови
 а) бетонска б) челична в) бетонска г) дрвена-бандажирана

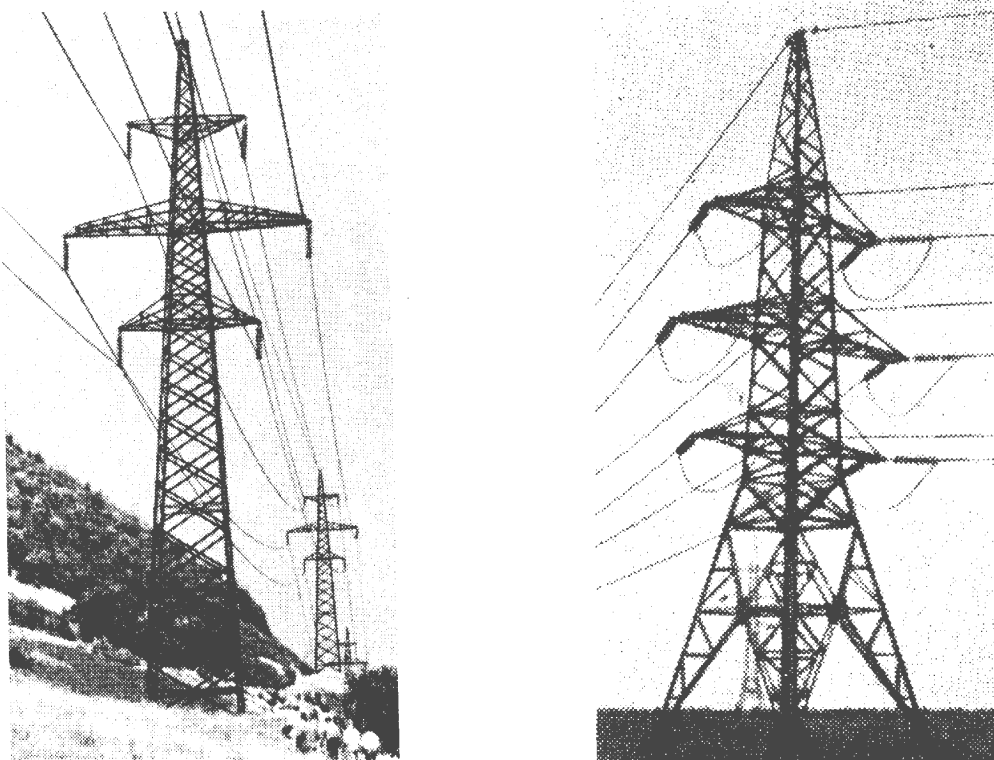


Слика 5.5. Изглед на дрвени столбови за висок напон
 а) линиски - портален б) аголно-затезен (А-столб)

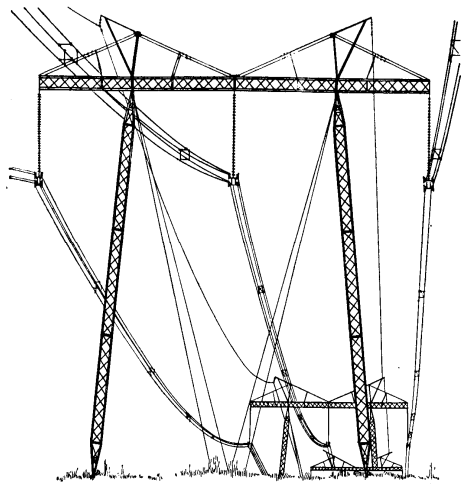
5.2.2 Железни (челично-решеткасти) столбови

Во денешно време, **челично-решеткастите столбови доминираат** во употребата за градба на надземните водови. Тие се значително **поцврсти** и **потрајни** од дрвените столбови. Можат **лесно** да **се транспортираат** во делови (демонтирани) дури и низ најнепристапните терени, а се **монтираат** на лице место, на самиот терен.

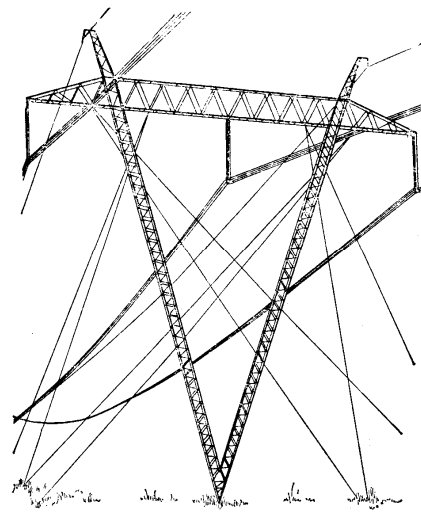
Овие столбови имаат решеткаста конструкција. Челично–решеткастиот столб има 4 аголни стапови (појасници) кои го преземаат главниот дел од механичкиот товар. Појасниците се вкруптени со дијагонални стапови (дијагонали). Појасниците и дијагоналите се изработуваат обично од аголно железо, а само во исклучителни случаи се користат специјални профили. Понекогаш се употребуваат и челични цевки кои се во механички поглед многу поповолни и а се и поекономични (заштеда на челик), но тие захтеваат сложена конструкција на јазлите од решетката, тешка за изведба итн. Ако челичните цевки се исполнети со бетон, им се зголемува крутоста, па оттаму доаѓа и заштедата во челик. Во таквата комбинација челичната цевка ги презема влечните напрегања, додека пак напрегањата на притисок ги презема бетонот, па целата конструкција е мошне отпорна на совивање и деформации.



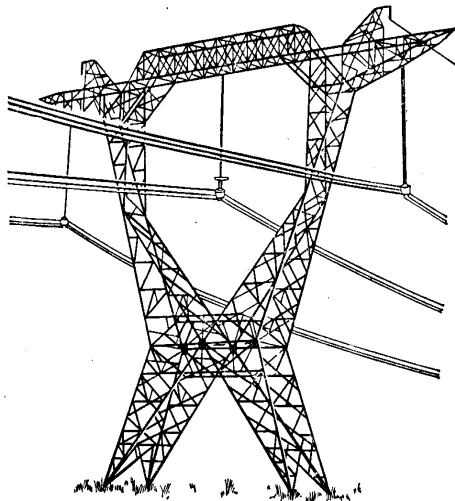
Слика 5.6. Челично–решеткасти столбови – двосистемски (110 kV) линиски (лево); аголно–затезен (десно)



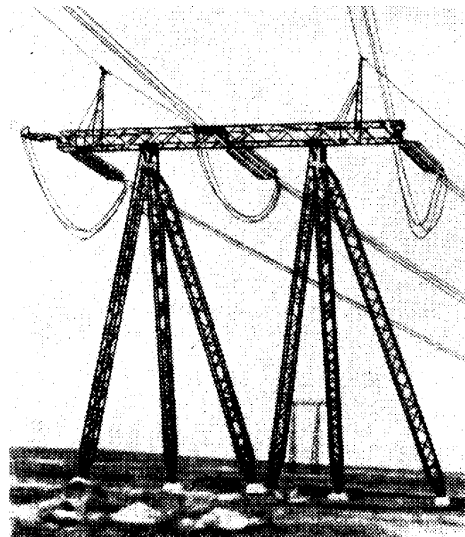
а) Портален линиски носечки столб за напон 750 kV



б) 750 kV носечки столб со затеги (тип "набла")



в) Носечки челично-реш. столб 1150 kV (во фаза на испитување)



г) Портален челично-решеткаст АЗ-столб (500 kV)

Слика 5.7 Челично-решеткасти столбови

Одделните елементи од челичната решетка обично се спојуваат со **завртки**, а некои помали делови од столбот можат уште во фабриката да се спојат со **заковки** или пак со **заварување**.

Основен недостаток на челичните столбови (како и кај сите челични конструкции) е тој што се тие **неотпорни на корозија**. Заштита од корозијата може да се спроведе со употреба на **легирани челици** што не рѓосуваат, меѓутоа тоа претставува скапо решение кое кај нас не се применува. Друг начин на заштита од корозијата е **нанесување на тенок заштитен слој**. Класичната заштита се состои во нанесување **миниум**, а потоа премачкување со **мрсна боја**. Притоа, за успешноста на овој начин на заштита не е важен само квалитетот на бојата, туку и претходната припрема на површината за бојадисување, што на веќе монтираниот столб претставува тешка и макотрпна работа.

Трајноста на заштитниот слој е ограничена па затоа, повремено, тој треба да се обновува. Од тие причини бојадисувањето е релативно скапо, а во погонот е непрактично.

Подобар начин за заштита е поцинкувањето со топла постапка. Топлото поцинкување е едноставен технолошки процес кој се состои од чистење на челикот во киселина па потоа миење во вода, сушење и негово потопување во купка со растопен цинк на определено време. Успехот на поцинкувањето многу зависи од искуството и вештината на оној што ја изведува оваа операција. Претенкиот слој цинк не ќе претставува доволна заштита, додека предебелиот слој ќе се одвојува (лупи) од челикот. Ваквите места подоцна можат да се поправат само со бојадисување.

Завртките и навртките (матиците) исто така треба да бидат поцинкувани (галански). Поцинкуваните делови од столбот не смеат дополнително да се обработуваат или заваруваат.

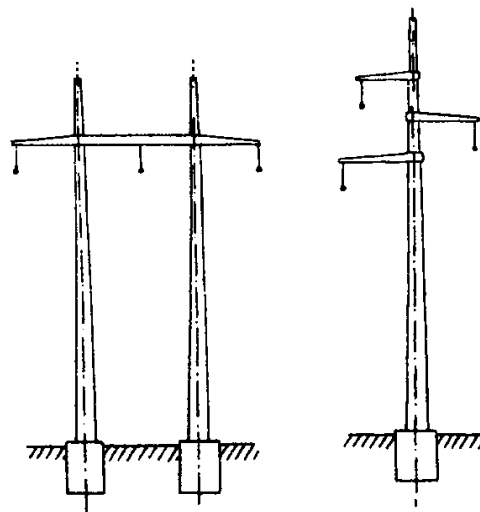
Понекогаш, заштитата на челично–решеткастите столбови е комбинирана. Горниот дел (главата) од столбот се штити од корозијата со поцинкување, а останатиот дел со бојадисување.

Челично–решеткастите столбови, соодветно заштитени од корозија, имаат долг век на траење – и до 50 години. Кај водовите со среден напон ($U_n \leq 35 \text{ kV}$) овие столбови се користат за распони од 100 до 200 m.

Кај водовите со висок и највисок напон ($U_n \geq 110 \text{ kV}$) денес, скоро без исклучок, се употребуваат челично–решеткастите столбови, и тоа за распони од 200 до 400 m.

5.2.3 Бетонски столбови

Овие столбови се произведуваат како армирано–бетонски. (сл. 5.8). Се употребуваат најмногу кај водовите со низок и среден напон ($U_n \leq 35 \text{ kV}$), а многу поретко и за повисоките напони.



Слика 5.8 Бетонски столбови

Отпорни се на атмосферските влијанија и имаат долг век на траење а надзорот и одржувањето кај нив се практично непотребни. Недостатокот на бетонските столбови е големата тежина, а во врска со тоа и големите транспортни и монтажни трошоци, особено во планинските и непристапните места.

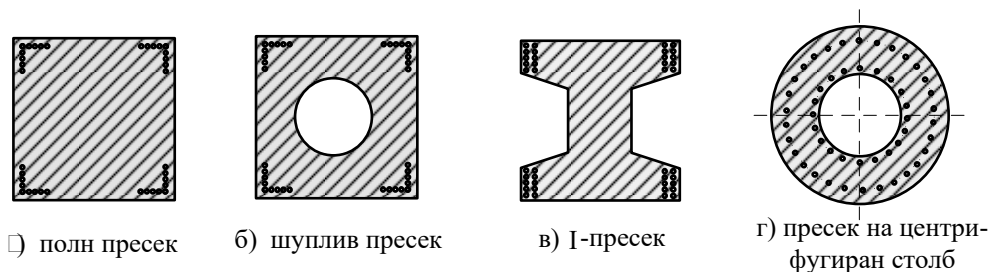
Армирано–бетонските столбови се произведуваат во фабрика или пак се лијат на терен, на самото место каде што ќе бидат поставени. Фабрички произведените столбови се, скоро без исклучок, центрифугирани. Се изработуваат во неколку дела кои подоцна се монтираат на теренот – на лице место. Ваквите столбови се употребуваат кај водовите со номинален напон до 35 kV и тоа како едносистемски или двосистемски. За разлика од нив, столбовите што се лијат на самиот терен, имаат пресек во форма на буквата „I“ или имаат форма на четириаголник (сл. 5.9). Полесните столбови обично се бетонираат во легната положба, додека тешките бетонски столбови се лијат во вертикална положба.

Армирано–бетонските столбови ги имаат следните недостатоци:

- гломазни се и тешки за транспорт;
- бетонот не може дополнително да се поправа или да се крпи, па изработката на овие столбови (леењето или центрифугирањето) мора да е многу квалитетна;
- при нивната изградба на лице место потребен е голем простор околу столбното место што доведува до зголемување на трошоците заради обештетување доколку столбот е лоциран на плодносно земјиште (градина, овоштарник и сл.).

Армирано–бетонските столбови имаат и добри особини. Надземен вод изведен со бетонски столбови ќе биде за 20–30% поевтин од истиот таков вод, изведен со челично–решеткасти столбови. Освен тоа, како што веќе беше кажано, бетонските столбови имаат долг век на траење (и преку 50 години), а во погонот не бараат речиси никакво одржување.

На сликата 5.9 се прикажани разни видови пресеци на армирано–бетонските столбови.



Слика 5.9 Пресеци кај армирано–бетонските столбови

5.2.4 Столбови од алуминиум

Алуминиумот во последно време во светот се почесто се користи за градба на високонапонски, па и среднонапонски водови. Алуминиумот како материјал за столбовите има низа предности во однос на останатите материјали, а тоа се главно големата отпорност према корозијата, лесната изработка, транспорт и монтажа и едноставното и евтино одржување. Единствен недостаток на овие столбови е нивната висока цена.

5.2.5 Столбови од армиран полиестер

Во поново време, во светот па и кај нас се изработуваат столбови од армиран полиестер. Ваквите столбови, поради својата ограничена височина (до 14 m) и ограничената механичка цврстина, обично се употребуваат во нисконапонските и среднонапонските дистрибутивни мрежи. Карактеристично за нив е тоа што се многу

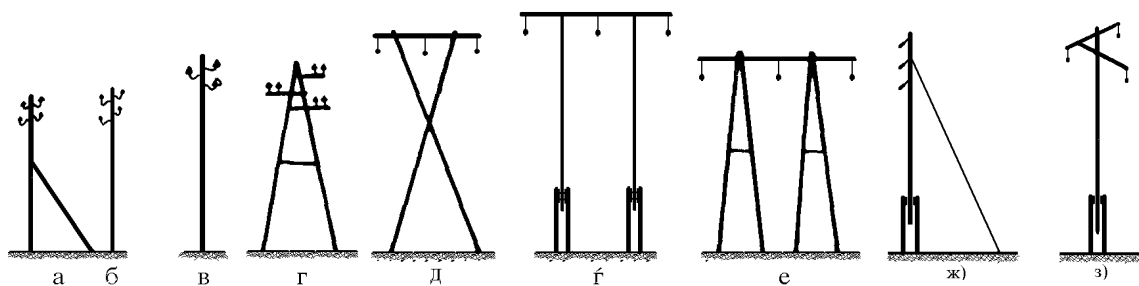
лесни (тие се над десетина пати полесни од соодветните бетонски или челично–решеткасти столбови), поради што лесно се транспортираат и монтираат практично без никаква опрема. Покрај тоа тие имаат убав естетски изглед и можат да се произведуваат во разни бои, отпорни се на секаков вид атмосферски влијанија, имаат долг век на траење и не бараат скоро никакво одржување. И кај нив, високата цена е практично единствениот недостаток.

5.2.6 Силуети на столбовите

Силуетата на еден столб претставува упростен приказ на неговата конструкција. Електричните столбови можат да имаат разновидни силуети. Самата конструкција на столбот мора да биде прилагодена на применетиот материјал. Притоа на дрвото и на бетонот му прилегаат поедноставни конструкции, додека кај челично–решеткастите столбови можат да се применуваат значително послободни форми и конструкции.

Бројот на спроводниците и нивната тежина (пресек), бројот на заштитните јажиња, начинот на обесување на спроводниците и нивниот распоред во просторот, влијаат на обликот на главата на столбот. На височината на столбовите пак влијае големината на распонот, т.е. посредно, номиналниот напон на водот.

Типични силуети на дрвените столбови се прикажани на сликата 5.10, додека на сликата 5.11 се прикажани типичните силуети што се среќаваат кај армирано–бетонските столбови.

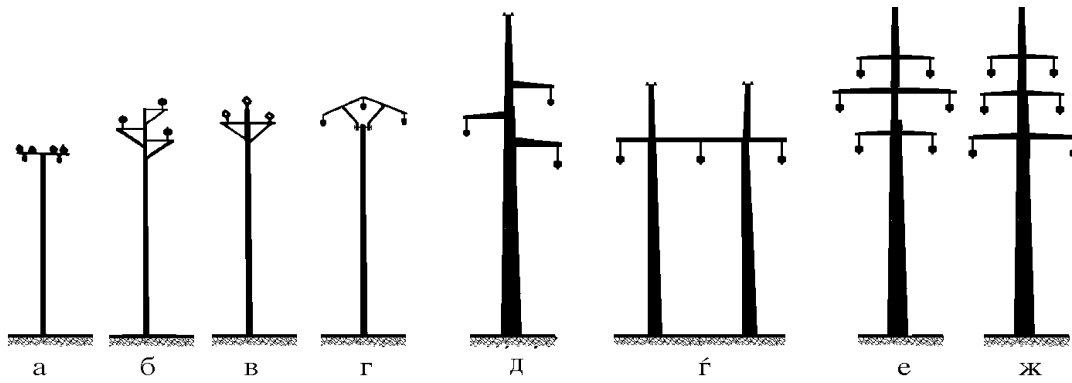


Слика 5.10 Типични силуети кај дрвените столбови

- а) аголен столб за нисок напон; б) нисок напон–линиски; в) 10–20 kV линиски;
- г) 10–20 kV аголен А–столб; д) 35 kV носив Х–столб;
- е) 110 kV носив портален столб; е) 35–110 kV затезен столб (двојна пирамида);
- ж) 35 kV аголен столб (усидрен, т.е. анкеран); з) 35–110 kV носив столб.

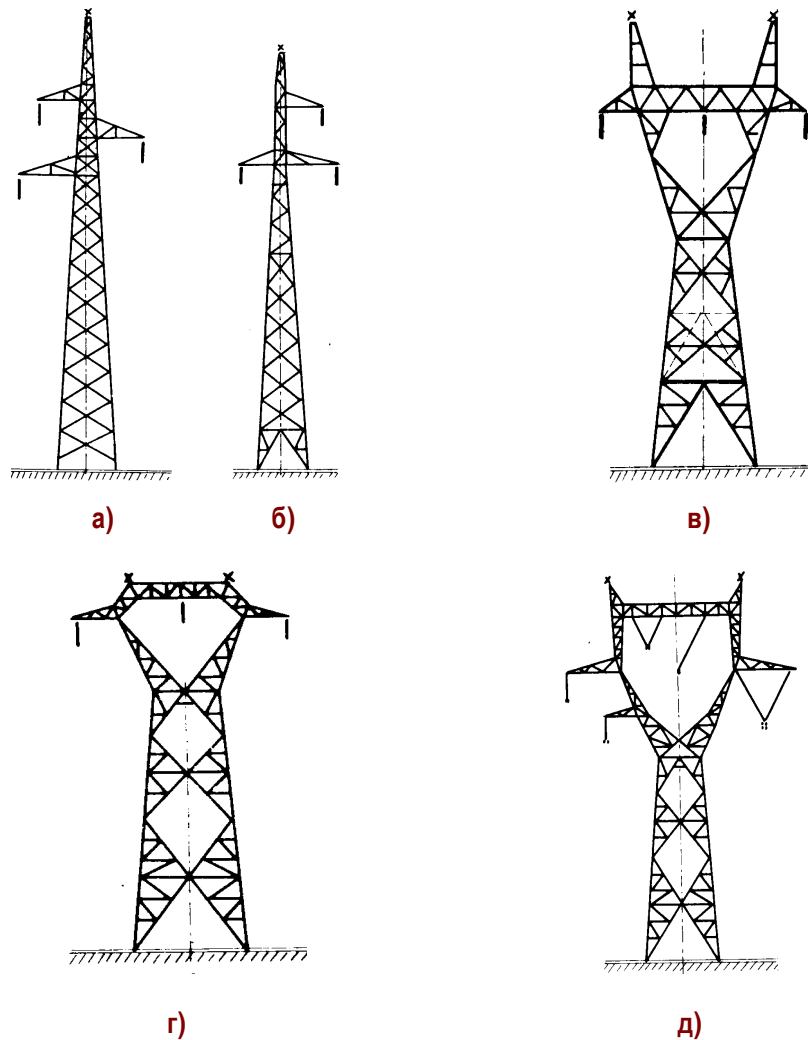
Профилниот челик дава значително поголеми можности за конструктивно обликување на столбовите. Затоа и бројот на разновидните по облик типови челично–решеткасти столбови е голем. Секој конструктор на електрични столбови тежи конструкцијата што ја создава да биде лесна и рационална. Тоа тежнение води повторно кон веќе препознатливите основни облици на конструкциите што се среќаваат кај дрвените и бетонските столбови.

На сликите 5.12, 5.13 и 5.14 се прикажани некои типични силуети на челично–решеткастите столбови.



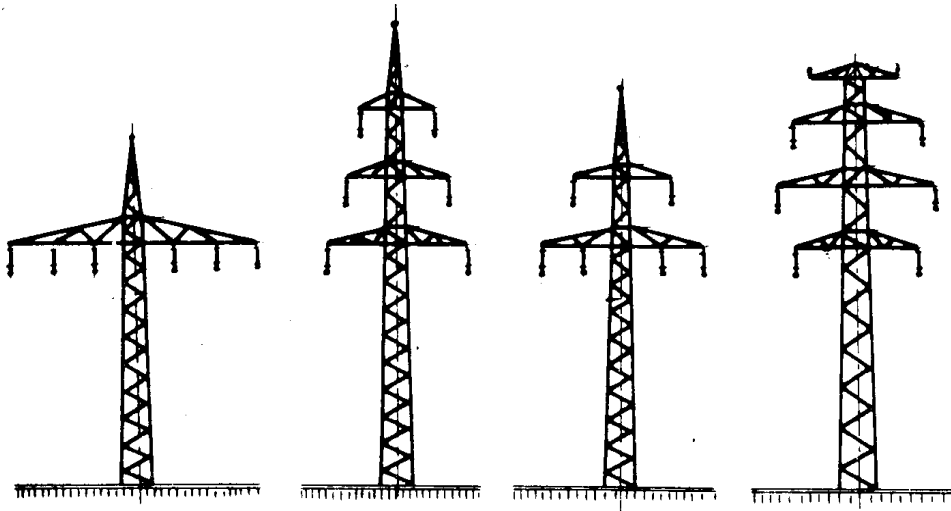
Слика 5.11 Типични силуети на бетонските столбови

а) низок напон ; **б), в), г)** 10 – 20 kV столбови; **д)** 35 – 110 kV тип “елка”;
е) 110 kV портален столб; **ж)** 35 – 110 kV тип “бочва”; **ж)** 35 – 110 kV “двојна елка”.



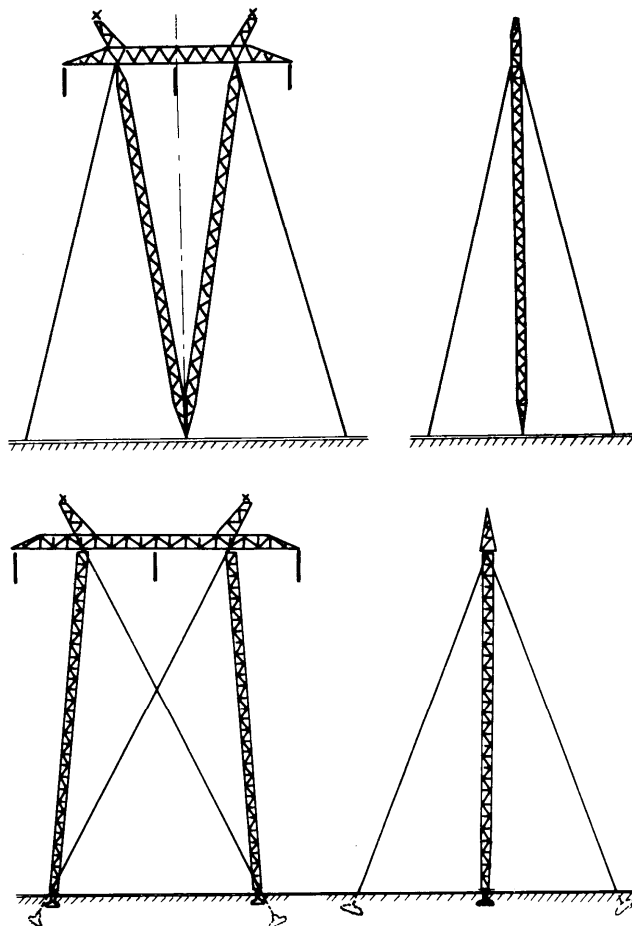
Слика 5.12 Едносистемски челично–решеткасти столбови

а) тип “елка”; **б)** тип “модифицирана елка”; **в)** “Y–столб”; **г)** столб тип “мачка”;
д) тип “модифицирана мачка” (истиот столб се користи како едносистемски, за напон 730 kV, или како двосистемски, за напон 380 kV).



Слика 5.13 Двосистемски челично–решеткасти столбови

- а)** столб со хоризонтален распоред на спроводниците; **б)** столб тип “двојна елка”;
в) столб тип “Дунав” **г)** столб тип “бочва”.



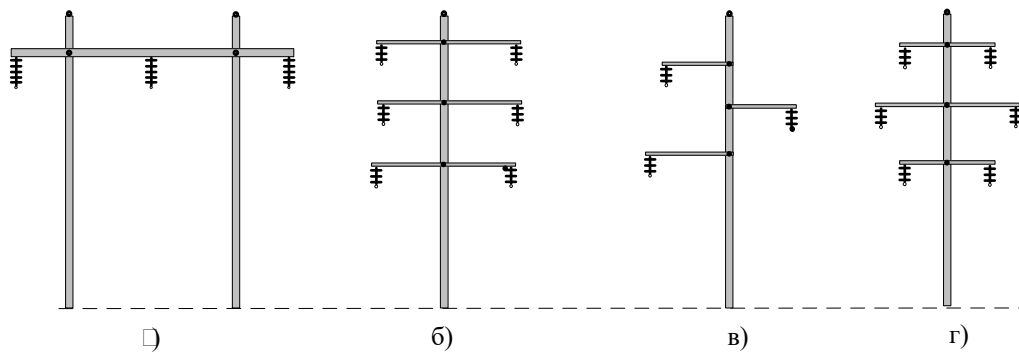
Сидрен столб тип „V“ (горе); „Фински“ тип на портален сидрен столб (долу)

Слика 5.14 Сидрени (анкерирани) челично–решеткасти столбови

5.2.7 Распоред на спроводниците на главата на столбот

Бројот на спроводниците и нивниот распоред на главата на столбот го условува и обликот на самиот столб. Водовите со една тројка спроводници се нарекуваат *едносистемски (единечни)*, (сл.5.15 а) додека водовите со две тројки се нарекуваат *двосистемски (двојни)* водови (сл. 5.15 б и г).

Спроводниците се поставуваат на столбовите на три различни начини, т.е. тие можат да имаат: *хоризонтален* распоред, *вертикален* распоред и *мешовит распоред* (слика 5.15).



Слика 5.15 Столбови со различен распоред на спроводниците

а) хоризонтален распоред; б) вертикален распоред; в) и г) мешовит распоред.

Водови со *хоризонтален распоред* на фазните спроводници се градат во местности со *тешки климатски услови*, карактеризирани со *големи зимски додатни товари*. *Височините* на ваквите столбови се обично *помали* од височините на соодветните столбови со поинаква диспозиција (распоред) на спроводниците на главата, но затоа пак *основата* на овие столбови и *широчината* на зафатениот простор долж трасата се *големи*. Столбовите со хоризонтален распоред на спроводниците обично се штитат од удари на молња со *две заштитни јажиња*.

Столбовите со *вертикален распоред* на спроводниците имаат релативно *големи височини* и се користат во оние случаи кога е потребно *основата* на столбовите како и широчината на трасата да бидат *мали* (минување низ *населени места, шуми, култивирани земјишта* и слично). Ваквите водови се штитат од атмосферските празнења со *едно заштитно јаже*.

Столбовите со *мешовит распоред* на спроводниците имаат помали височини од претходните, а исто така имаат помала основа и захтеваат помалку простор од оние со хоризонтален распоред на спроводниците. Кај нив, значи, *се здружуваат предностите* на претходните две врсти столбови. Затоа, *во најголем број случаи*, без оглед на напонското ниво на водот (освен кај највисоките напони), водовите се прават со *мешовит распоред* на фазните спроводници.

Најчесто употребуван распоред на спроводниците за сите напонски нивоа е *триаголниот распоред* (слика 5.12 а,б). Најниската конзола е оддалечена од највисоката на *доволно растојание*, така што *веројатноста* за настанување на *меѓуфазни куси врски* при отскокнувањето на спроводниците во случајот кога доаѓа до *нагло отпаѓање* на зимскиот додатен товар е мала.

Добар распоред на фазните спроводници имаме и во случаите на *хоризонтален распоред* (слика 5.12 в; слика 5.13 а итн.). Ни овде нема опасности од појави на куси

врски при отпаѓање на зимските додатни товари. Наедно, столбовите се овде најниски а со тоа и најмалку изложени на атмосферски празнења. Сепак, треба да се има на ум дека овој тип столбови зазема **доста простор** и поставува посебни барања во поглед на **сечењето на шуми** итн. Далекуводите со највисоки напони многу често се прават со ваков тип столбови.

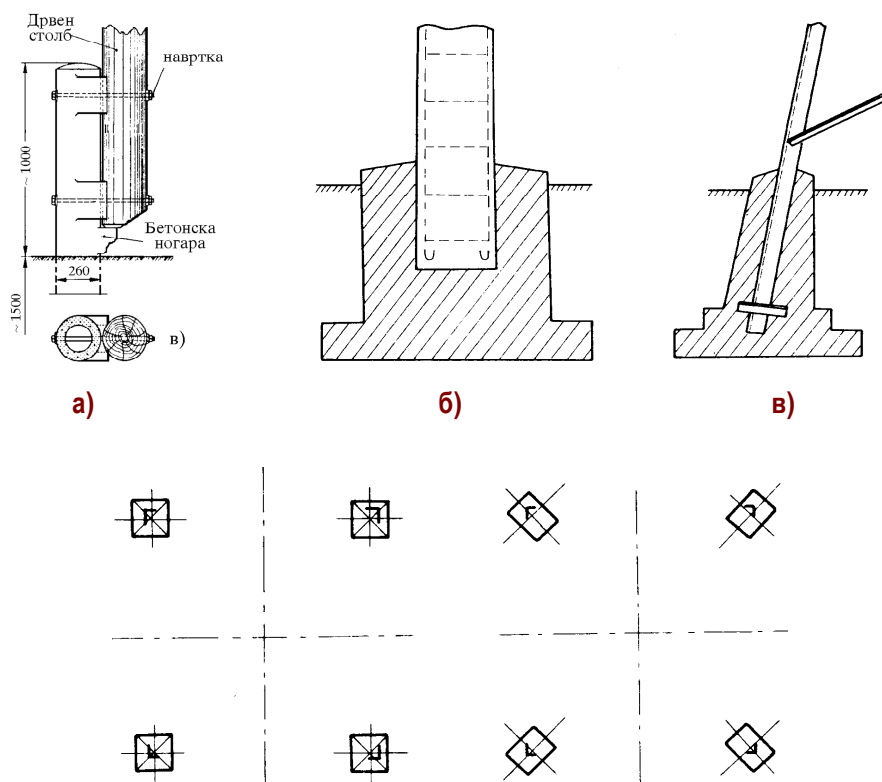
Француската варијанта на овие столбови, со подигнат среден спроводник (слика 5.11 г кај бетонските столбови за среден напон) и водовите од типот “мачка” (слика 5.12 г) за високите напони овозможува донекаде стеснување на основата на столбот.

Столбовите од **типот “смрека”** (слика 5.11 ж и слика 5.13 б) заради големината на долната конзола не се многу применливи за траси што минуваат преку **угорници и ридови**. Во тие прилики, кај нас, а и во светот, почесто се употребуваат столбовите од типот “**бочва**” (слика 5.11 е и слика 5.13 г). Овој тип се покажал како многу **економичен** и се користи особено во **шумските предели** и онаму каде што има тешкотии со **изнаоѓањето нови траси** за далекуводите, и покрај тоа што тој води до релативно високи конструкции.

Во групата на пониските двосистемски столбови спаѓа “**двојно триаголната**” изведба или тнар. “**дунавски тип**” столбови (сл. 5.13 в).

Порталниот тип столбови за две тројки спроводници, прикажан на сликата 5.13 а, обично се користи во **рамнинските предели**.

5.3 ТЕМЕЛИ ЗА СТОЛБОВИТЕ



Слика 5.16 Разни видови темели – монолитни (едноделни) и расчленети:

а) бетонски ногари за дрвен столб; б) единечен темел за бетонски столб; в) стопа за една нога за расчленет темел; изглед на четирите расчленети стопа (долу)

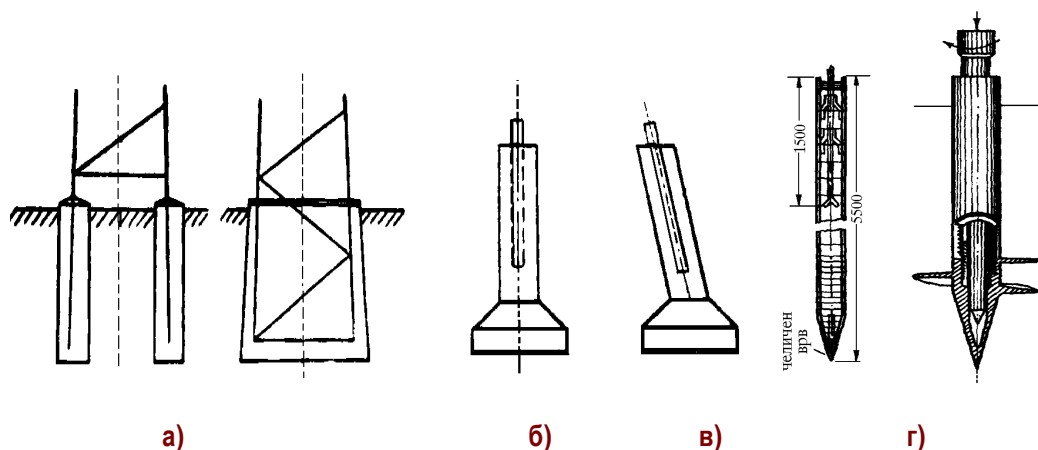
Улогата на темелот е силите што делуваат на столот да ги пренесе на тлото. Според тоа, темелите можат да бидат **напрегнати на притисок** (вертикално надолу), на **извлекување** (вертикално нагоре) и на **превртување**. Обликот и големината на темелот зависи од видот на напрегањето и неговата големина, но зависи и од особините на тлото. При изборот на темелот треба да се води сметка и за присутноста на подземни води во почвата кои ја намалуваат тежината на темелот (Архимедов закон). Сите наведени елементи треба да бидат познати при проектирањето и изборот на темелите.

Дрвените и некои од поедноставните типови фабрички произведени армирано–бетонски столбови, во принцип, се вкопуваат непосредно во тлото, без потреба од посебни темели. Стабилноста на столбот во тој случај се постигнува со самата конструкција на оној негов дел, кој се вкопува во земјата. Така, на пример, кај дрвените портали, А–столбови и пирамиди (слика 5.10 г, д и е), поедините балвани се поврзани под земјата со темелни пречки, наречени “плочи”. Со цел дрвените столбови да се заштитат од трулење и пропаѓање во тлото, понекогаш тие се темелат со помош на бетонски ногари или бетонски темели, како што е тоа прикажано на сликите 5.4, 5.5 и 5.16.а.

Армирано–бетонските и челично–решеткастите столбови имаат темели од неармиран или од армиран бетон.

Столбовите со повеќе нозе (бетонските портални столбови, како и сите врсти челично–решеткасти столбови) можат да имаат само еден темел за целиот столб (**монолитен темел**) (сл. 5.16.б), или пак за секоја нога да имаат засебно по една стопа (**расчленет темел**) (слика 5.16.в). Расчленетите темели кај челично–решеткастите столбови со четири нозе, се сместуваат во темињата на еден квадрат или правоаголник, во зависност од конструкцијата на столбот (слика 5.16 долу).

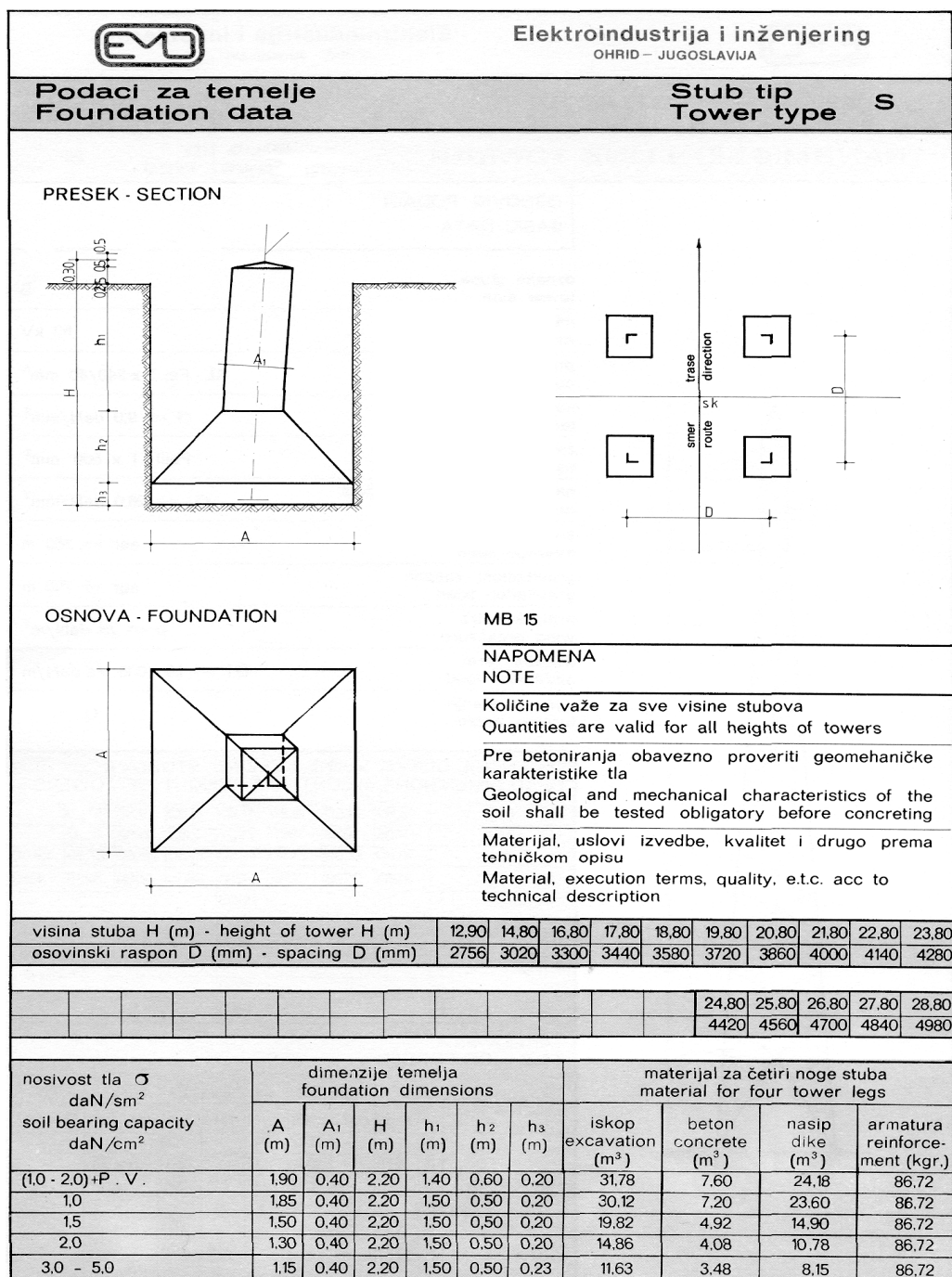
Обликот на самиот темел може да биде сосема едноставен (на пример правоаголна призма, како на сл. 5.17 б) или пак сложен (како на сл. 5.17 в, г).



Слика 5.17. Останати видови темели за челично-решеткасти столбови
а) темел составен од два блока; б) стопа–права; в) стопа–коса; г) пилоти за темел

Бетонските темели по потреба се армираат со бетонско железо (железна арматура). Местото каде што столбот влегува во темелот мора да биде чисто и суво. За таа цел врвот од темелот мора да стчи околу 20 cm над површината на земјата, а неговата горна површина мора да биде изведена со косина. Таа треба да биде добро измалтарена или бојадисана со боја за импрегнација, за да се спречи задржувањето и продорот на влагата во самиот темел.

Бетонските темели се изведуваат на лице место, на самиот терен, при претходно извршен соодветен ископ на земјиштето. За да се добие правилен облик на темелот и да се потроши само потребното количество бетон, бетонирањето се врши во оплата. Кај типизираните темели, оплатата може да биде лимена, наменета за повеќекратна употреба. Често пати се употребуваат и однапред припремени, фабрички изработени темели, со што се овозможува, кога условите на теренот тоа го дозволуваат, да се применува и механизација при темелењето на столбовите. На тој начин се постига заштеда во време и материјал како и висок квалитет при изведувањето на работите околу самото темелење.



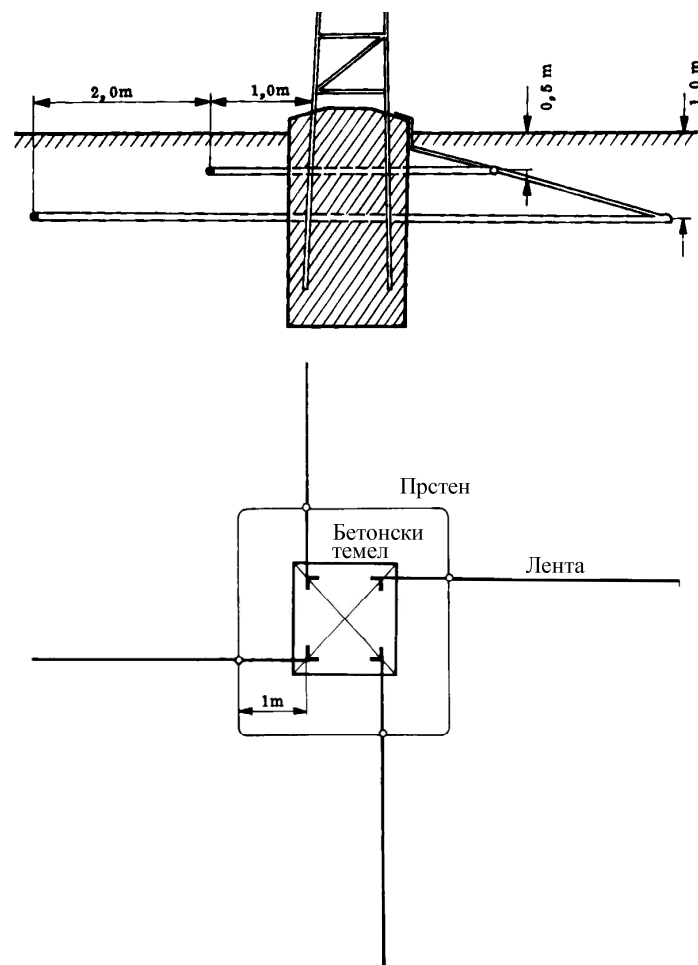
Слика 5.18 Типски темел на 110 kV челично-решетки столбови од фамилијата "S" (ЕМО-Охрид)

На сликата 5.18 се прикажани основните податоци за темелот наменет за носивиот столб тип „S“, производ на ЕМО–Охрид. Димензиите на темелот и количеството на утрошениот материјал за неговата изведба, како што се гледа од самата слика, зависат од карактеристиките (носивоста) на тлото во кое тој треба да биде поставен.

5.4 ЗАЗЕМЈУВАЊЕ НА СТОЛБОВИТЕ

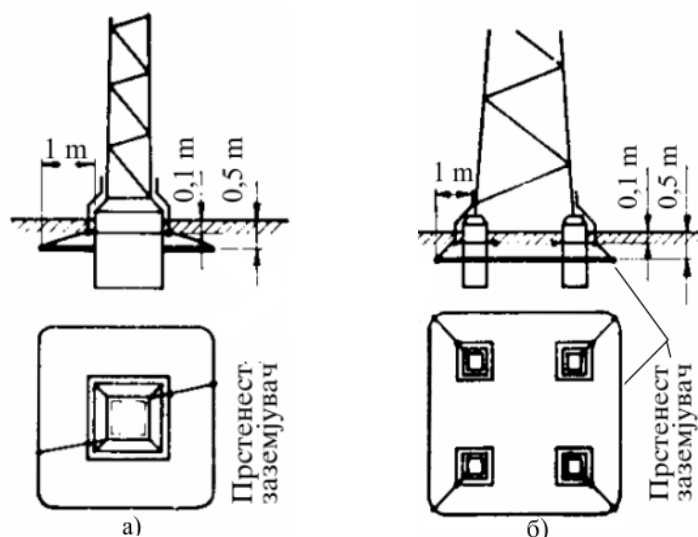
Во принцип, постојат три врсти на заземјувачи: *цевкасти* заземјувачи (вертикално забиени челични цевки, долги по неколку метри), *плочести* заземјувачи (вертикално вкопани метални плочи) и *лентести (тракасти)* заземјувачи (жица, јаже, поцинкувано валчесто железо или челична лента, закопана на определена длабочина во земјата). Заземјувачите треба да бидат *отпорни на корозија*, а тоа се постига со заштита (*поцинкување*) или пак со избор на *соодветен материјал* (нпр. *Cu*).

Заземјувачите на столбовите од далекуводите најчесто се изведуваат како *лентести*, обликувани во форма на *еден или два прстена*, закопани на длабочина од *0,5* односно *1 m* околу темелот на столбот (сл. 5.19). Често пати, како заземјувач се употребуваат *2–4 зракасто поставени краци* изработени од челични поцинкувани *ленти* или челични *жици*, а понекогаш се применуваат и разни комбинации од прстени и во исто време зракасто поставени челични ленти.



Слика 5.19 Изглед на заземјувач изведен околу бетонскиот темел на челично–решеткаст столб

На сликата 5.20 а е прикажан **прстенест заземјувач** за челично-решеткаст столб за среден напон ($U_n \leq 35 \text{ kV}$), со **монолитен темел**, додека на сликата 5.20б е прикажан прстенест заземјувач за челично-решеткаст столб за висок напон ($U_n \geq 110 \text{ kV}$) со **расчленет темел**. И во обата случаја прстенот, којшто најчесто се изведува од поцинкувано **валчесто железо $\Phi 10$** или од **поцинкувана челична лента $\text{FeZn } 30 \times 4 \text{ mm} \times \text{mm}$** , е закопан на длабочина $h = (0,5 - 0,8 \text{ m})$ и во основа служи за **обликување на потенцијалот** во околината на самиот столб со цел **напонот на допир и чекор** да биде што е можно помал.



Слика 5.20 Прстенест заземјувач изведен околу бетонскиот темел на челично–решеткаст столб

При однапред позната (претходно измерена) вредност на **специфична отпорност на тлото**, се врши **пресметка на заземјувањето** и **избор на типот** на заземјувачите на столбовите. По нивната изведба, со **мерење на самиот терен** се врши **контрола на отпорот на распростирање** на заземјувачите, и **по потреба**, се врши дополнително **проширување** и **корегирање** на заземјувањето.

Заштитното јаже е елемент кој исто така припаѓа на **заземјувачкиот систем (ЗС)** на водот. Покрај неговата **основна задача** да ги **штити фазните спроводници** од **директни атмосферски празнења**, тоа придонесува и за сигурната работа на **заштитата** од кусите врски, а во исто време галвански **ги поврзува заземјувачите** на сите столбови од далекуводот па на тој начин го **подобрува** целокупниот систем на заземјување. За првата функција, доволно е и заштитно јаже изработено од **челик**, но за останатите две функции, пожелно е заштитното јаже да биде изведено од електрички поспроводен материјал (на пр. **Al/C јаже** со зголемена механичка јачина). Јажето мора на секое столбно место сигурно и квалитетно да биде **галвански поврзано** со заземјувачот, било преку самото тело на столбот кај челично–решеткастите столбови, било **преку железната арматура** кај армирано–бетонските столбови. Кај дрвените столбови, тоа се поврзува со заземјувачот со помош на **земјоводот**. Заземјувачи не се изведуваат единствено кај НН и кај СН водови со дрвени столбови без заштитно јаже.

6 МЕХАНИЧКА ПРЕСМЕТКА НА НАДЗЕМНИТЕ ВОДОВИ

6.1 ВЛИЈАНИЕ НА КЛИМАТСКИТЕ УСЛОВИ ВРЗ РАБОТАТА НА ДАЛЕКУВОДИТЕ

Надземните водови се со сета своја должина подложни на атмосферски дејства на околната средина. Параметрите со кои се карактеризираат атмосферските услови претставуваат влезни показатели за механичкото димензионирање на спроводниците, заштитните јажиња, столбовите, темелите и уредите за спојување (арматурата) кај надземните водови. Тие параметри се:

- температурата на воздухот;
- брзината на ветрот;
- интензивноста и зачестеноста на зимските додатни товари од снег и мраз;
- влажноста на воздухот;
- интензивноста на атмосферските празнења и
- друго.

Атмосферските услови на кои е изложен надземниот вод зависат од географската положба на припадната територија, надморската височина, карактерот на измените на климата во текот на годината и т.н. Бидејќи должината на еден надземен вод може да биде прилично голема (сто па и повеќе километри), физичко–географските услови долж трасата можат да се менуваат во многу голема мера. Тоа наложува, параметрите на климатските услови за секој климатски регион долж трасата од водот да се определуваат засебно.

Параметрите со кои се карактеризира климата на даден географски регион се случајни величини, кои се повторуваат периодично, со определен временски период. За да се определат параметрите на климата, неопходно е систематски да се вршат долгогодишни метеоролошки набљудувања. Насобраните податоци во врска со климатските параметри се обработуваат статистички и на тој начин се добиваат климатските параметри на посматраниот регион, неопходни за механичкото димензионирање на надземните водови.

При механичкото димензионирање и проектирањето на надземните водови кај нас, влијанието на околната средина (климатските услови) се зема предвид преку: 1. *температурата*, 2. *дејството на ветрот*, и 3. *зимските додатни товари*.

6.1.1 Температура на воздухот

Промената на температурата на воздухот предизвикува промена на напрегањето на затегање и промена на провесот кај спроводниците и заштитните јажиња од далекуводите. Од особена важност за пресметката на надземните водови е точното познавање на максималната, минималната и средногодишната температура на воздухот за територијата низ која минува трасата од разгледуваниот далекувод, како и температурата при која обично на спроводниците и јажињата се нафаќаат зимските додатни товари.

Според нашиот правилник [1], спроводниците и заштитните јажиња *се пресметуваат под претпоставката* дека:

- минималната температура изнесува -20°C ;
- максималната температура изнесува $+40^{\circ}\text{C}$;
- средногодишната температура изнесува $+15^{\circ}\text{C}$;
- температурата при која се јавува додатното оптоварување на спроводниците /јажињата поради снег, мраз или сињак изнесува -5°C .

Заради упростување на самите механички пресметки, кај нас овие претпоставки се усвојуваат секогаш, без оглед на географска положба или надморската височина на теренот низ кој ќе минува проектираниот далекувод.

Споменатите температури служат за пресметка на спроводниците и заштитните јажиња, т.е. тие претставуваат сметковни температури. Фактичните температури, како што е познато, варираат како во текот на деноноќието, така и во текот на годината. Тие зависат од брзината на ветрот, големината на сончевата радијација, упадниот агол на сончевите зраци, чистотата на атмосферата и друго. Значи, вистинските температури во погонот можат и да ги надминат споменатите сметковни температури, но ова ќе се смета за допуштено доколку со тоа нема да дојде до оштетување на материјалот поради превисоките температури или пак да дојде до опасни приближувања на спроводниците до околните објекти, поради преголемиот провес.

Максималната дозволена температура на спроводниците, поради трајно дозволениите струи на оптоварувањето, изнесува $+80^{\circ}\text{C}$, што е во привидна спротивност со пропишаната максимална сметковна температура на спроводникот, потребна за пресметка на провесот. Провесите на спроводниците при $+80^{\circ}\text{C}$ се значително поголеми од оние при $+40^{\circ}\text{C}$. Така на пример кај комбинираниите $\text{Al}/^{\wedge}$ јажиња, за вообичаените распони што се среќаваат кај 110 kV водови, разликата на провесите при споменатите температури ќе изнесува околу 1,5 метри. Апсолутните разлики во провесите ќе бидат уште поголеми кај водовите со поголеми номинални напони и поголеми пресеци на спроводниците. Сепак, мала е веројатноста да дојде до проблеми поради преголемиот провес на спроводниците, доколку водот е изграден според прописите и не е во дефект. За тоа е потребно совпаѓање на поголем број непожелни настани: температурата на околниот воздух да изнесува 40°C , да имаме отсуство на било какво струење на воздухот, водот да биде максимално струјно оптоварен, под најниската точка на далекуводот да постои критично приближување до некој објект на земјата итн.

Во високонапонските преносни мрежи, надземните водови се од економски, па и технички причини, струјно оптоварени со струја која е под 50% од дозволеното струјно оптоварување на спроводниците дури и во режимите со максимално оптоварување. Со тоа се постигнува надтемпература на спроводниците од најмногу десетина степени, и тоа во услови без ветар, што повторно претставува мошне ретка појава. Според тоа истовремената коинциденција на сите горе споменати појави која ќе доведе до проблеми во погонот е, навистина, сосема малку веројатна.

Сепак, за водовите кај кои во нормален погон се очекува честа појава на зголемени струјни оптоварувања, Правилникот [1] препорачува провесот на спроводниците да се пресметува со температура од $+60^{\circ}\text{C}$.

6.1.2. Дејство на ветрот

Ветрот претставува преместување на воздушните маси од области со повисок притисок кон области со понизок атмосферски притисок. Параметрите со кои се карактеризира ветрот се:

- насоката,
- брзината и
- врстата на воздушната струја.

Објектите на површината од земјата влијаат врз параметрите на ветрот. Населените места и шумите ја намалуваат неговата брзина. Во планинските области, ветрот се канализира по долините. Правецот на воздушното струење се совпаѓа со правецот на големите реки. Во приморските области ветровите имаат правец на дејствување нормално на морскиот брег.

Ветровите се означуваат со името на насоката од каде што дуваат. Така, на пример, западен ветер е оној ветер којшто има насока на дејствување од запад кон исток. Насоката на ветрот и неговата појава се менуваат постојано, но во текот на еден определен временски период (месец, сезона или година), тој има определена насока која доминира. За оценка на зачестеноста на појавата на ветер во дадената насока, се формира дијаграм, наречен „роза на ветрот“.

Брзината на ветрот се мери во m/s или km/h ($1 \text{ m/s} = 3,6 \text{ km/h}$). За оценка на брзината на ветрот, воведена е единицата Бофор (Baufort). Во скалата на Бофор има 17 степени за брзината на ветрот. Со помош на оваа скала брзината на ветрот се проценува врз основа на описот на дејствувањето на ветрот врз предметите и објектите на земјата (состојба на дрвјата, дејствување на ветрот врз човекот, состојба со морската површина и друго).

Видот на воздушната струја зависи од постојаноста на насоката на ветрот, неговата брзина и топлинска состојба. Ветрот може да биде:

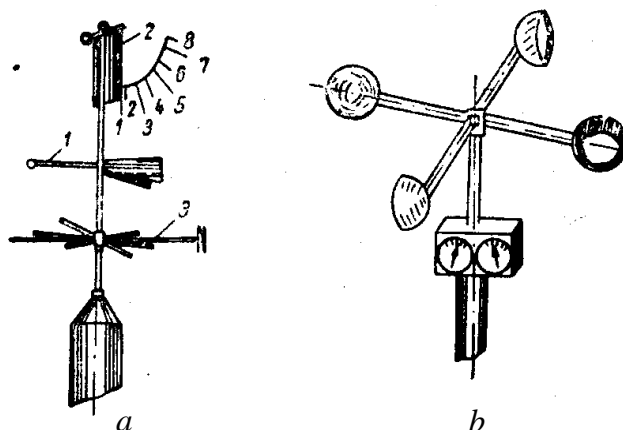
- хомоген (*ламинарен*) или
- променлив (*турбулентен*).

Воздушниот поток е ламинарен кога целата воздушна маса има иста насока, иста брзина и иста топлинска состојба. Во приземните слоеви таквиот воздушен поток може да постои само при релативно мали брзини на ветрот (најмногу 5 – 6 m/s). Со зголемување на височината над земјата, воздушниот поток може да има хомоген карактер и при поголеми брзини.

Турбулентниот воздушен поток се карактеризира со променлива сила на дејствување на воздушната маса при што брзината на ветрот се менува, но се запазува насоката на неговото дејствување.

Творбите на површината на земјата (шуми, населби, долини, ридови и друго) го нарушуваат хомогениот карактер на ветрот. Средните брзини на ветрот при турбулентното движење на воздушните маси се поголеми отколку истите при ламинарното движење. Моментните вредности на брзината на ветрот кај турбулентното движење на масата може да достигнат и неколку десетини m/s.

Брзината на ветрот се мери со ветромер или анемометар (сл. 6.1), на височина од околу 10 m над тлото. Покажувањата на ветромерот (моментните вредности на брзината, како и насоката на дејствување) се отчитуваат повеќе пати во текот на денот.



Слика 6.1 Ветрометри (анемометри)
а) Wild–ов анемометар б) чашковиден анемометар

Со оддалечување од површината на земјата, брзината на ветерот се зголемува. Зависноста на брзината на ветерот v_h на височина h од самата височина над површината на земјата има логаритамска природа. При позната брзина v_{10} на височина од 10 m, таа може да се опише со следната емпириска релација:

$$v_h = v_{10} \cdot \log \sqrt{10 \cdot h} . \quad (6.1)$$

Врз основа на релацијата (6.1) е добиена табелата 6.1 во која е прикажана зависноста на односот v_h/v_{10} од висината над површината од земјата.

Табела 6.1. Табеларен приказ на зависноста (6.1)

h, m	10	15	20	25	30	35	40	45	50
v_h / v_{10}	1,0	1,09	1,15	1,20	1,24	1,27	1,30	1,33	1,35

Силата F со којашто ветерот притиска врз тело со површина S се определува со помош на следната формула:

$$F = c_v \cdot P_v \cdot S \cdot \sin \varphi . \quad (6.2)$$

Во последната формула со c_v е означен т. н. *коэффициент на аеродинамичко дејство на ветерот*, додека φ е нападниот агол под кој ветерот дејствува врз површината S .

Притисокот P_v на ветерот зависи од кинетичката енергија на масата воздух со волумен $1 m^3$ која се движи со брзина v . При нормален атмосферски притисок 1013 mbar (760 mm Hg) и при нормална температура $15^\circ C$, притисокот на ветерот P_v , изразен во daN/m^2 , може да се пресмета со помош на следниот израз:

$$P_v = \frac{v^2}{16} . \quad (6.3)$$

При механичкото димензионирање на далекуводите се зема дека правецот на ветерот е хоризонтален. Покрај тоа, за нападниот агол φ се усвојува дека тој изнесува 90° , т.е. ветерот дејствува нормално врз нападната површина.

При утврдувањето на дејството на ветерот, за површина S на објектот се зема фактичката незамрзната површина нападната од ветерот, додека за цилиндричните објекти (спроводници, јажиња, цевкасти столбови и др.), се зема проекцијата на неза-

мрзнатата нападна површина. За решеткастите столбови се земаат само површините што се изложени на ветрот.

При пресметувањето на притисокот на ветрот со помош на изразот (6.3), се работи со максималната брзина на ветрот v , изразена во m/s, која на разгледуваниот потег од трасата се појавува просечно еднаш на пет години. Кога се работи за димензионирање на 380 kV водови, поради важноста на водовите се работи со зголемена сигурност па кај нив притисокот на ветрот се пресметува со максималната брзина v што се јавува просечно еднаш на секои 20 години.

Максималните брзини на ветрот во поедините години треба да се утврдуваат врз основа на мерења, и со примена на статистичка обработка на мерените податоци. Пресметковната максимална брзина v , со која ќе се пресметува притисокот на ветрот, треба да се определува со 80% веројатност на нејзиното настанување (што би значело дека ризикот таа да биде надмината во текот на годината ќе изнесува 20%).

Вака определениот притисок на ветрот, по статистички пат, се нарекува „петгодишен ветар“ и се применува за основната висинска зона од 0 до 40 m над површината на земјата, но тој не смее да биде помал од 50 daN/m². Добиените сметковни вредности на притисокот на ветрот треба да се зголемат до првата поголема вредност од следната низа на вредности:

$$60, 75, 90, 110 \text{ и } 130 \text{ daN/m}^2. \quad (6.4)$$

За деловите од водот што се наоѓаат во зоната помеѓу 40 и 80 m над земјата, се земаат зголемените вредности на притисокот на ветрот, според табелата 6.2.

Табела 6.2 Сметковни вредности за притисокот на ветрот

Височинска зона на ветрот	Притисок на ветрот, daN/m ²				
Водови со вкупна височина до 15 m над земјата	50	60	75	90	110
Основна височинска зона од 0 до 40 m над земјата	60	75	90	110	130
Делови на водот во зоната помеѓу 40 и 80 m над земјата	75	90	110	130	150

Во таа смисла, за утврдување на вредноста на притисокот на ветрот врз спроводниците односно врз заштитните јажиња при димензионирањето, меродавна е височината на нивната точка на зацврстување во стегалката на односниот столб. Вредностите од табелата 6.2 можат и да се зголемат, зависно од условите на теренот.

При определувањето на коефициентот на аеродинамичкото дејство на ветрот c_v , се зема предвид дејството на ветрот на притисокот, шмукањето, дејството на ветрот на задната страна од решеткастите конструкции, како и намалувањето на дејството на ветрот врз спроводниците и заштитните јажиња поради тоа што максималниот притисок никогаш не се јавува истовремено по должината на целиот распон. Кај спроводниците во сноп, засолнетоста на спроводниците нема влијание и во пресметките се зема притисокот на ветрот врз секој спроводник од снопот.

Коефициентите на дејството на ветрот за одделни делови на водот изнесуваат:

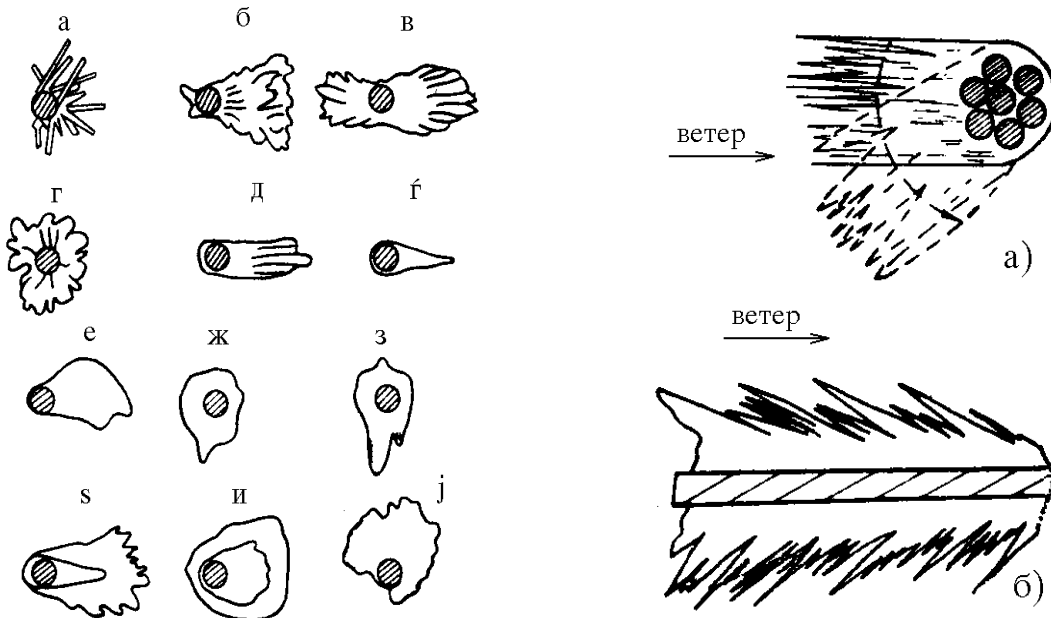
- за столбови со четириаголен пресек 1,4
- за столбови со шестоаголен и осмоаголен пресек 1,0

- за столбови со тркалезен пресек 0,7
- за решеткасти столбови од профилиран челик во рамнина 1,4
- за решеткасти столбови од цевки во рамнина 1,1
- за четириаголни решеткасти столбови од профилиран челик 2,6
- за четириаголни решеткасти столбови од цевки 2,0
- за спроводници и заштитни јажиња 1,0

6.1.3 Зимски додатни товари (зДТ)

Во атмосферата секогаш постои определено количество влага во форма на ситни водни капки или водена пареа. При снижување на температурата на воздухот под 0°C , агрегатната состојба на водената пареа или на водните капки може да се задржи и покрај тоа што се тие подладени, под температурата на замрзнување на водата. Ако воздушната маса, во која што се содржи и определено количество подладена вода во форма на капки или пареа, дојде во допир со цврсти предмети чија температура е пониска од 0°C , тогш подладената вода скоро моментално замрзнува врз нив и ги покрива со мраз или сињак.

Подладените ситни капки вода во допирот со студените предмети образуваат слана или кристален сињак со релативно мала густина, $0,05 \div 0,15 \text{ gr/cm}^3$. Ваквите творби, нафатени врз спроводниците создаваат релативно мали додатни товари. Подладените капки во допир со студените предмети образуваат зрнест сињак, кога се работи за мали по обем капки, односно мраз, кога е работи за поголеми капки. Големите водни капки пред замрзнувањето се разливаат по површината на спроводникот/јажето и го покриваат рамномерно со мраз. Густината на зрнестиот сињак изнесува од $0,4 \div 0,6 \text{ gr/cm}^3$, додека густината на нафатениот мраз се движи во границите од $0,6 \div 0,9 \text{ gr/cm}^3$.



Слика 6.2 Облици на зимските додатни товари

Појавата на сињак и мраз врз спроводниците најчесто се забележува при температури на воздухот од $-0,5^{\circ}\text{C}$ до -5°C , а многу поретко и при пониски температури.

Најинтензивно замрзнување на спроводниците настанува при температура на воздухот од околу -5°C . Затоа, температурата -5°C се усвојува како сметковна температура при која врз спроводниците и заштитните јажиња се нафаќаат зимските додатни товари.

Замрзнувањето на спроводниците кај далекуводите настанува практично независно од тоа дали водот е исклучен од погон или пак тој е номинално струјно оптоварен.

Набљудувањето на оваа појава кај далекуводите покажало дека дебелината δ на обвивката од нафатениот зимски додатен товар зависи од пречникот d на спроводникот/јажето и од височината на обесување над земјата. Со зголемувањето на пречникот на спроводникот, количеството на нафатениот зимски додатен товар постепено расте, но дебелината на нафатениот слој мраз се намалува, и обратно. Со зголемувањето на височината на спроводниците и јажињата над земјата, големината и зачестеноста на појавените зимски додатни товари исто така расте.

Според нашите прописи, при механичката пресметка на спроводниците и заштитните јажиња се претпоставува дека на нив се создава додатно оптоварување од сињак, мраз или влажен снег. Се смета дека додатното оптоварување дејствува вертикално надолу и како такво, тоа се додава на тежината на спроводникот односно заштитното јаже.

Кај споменатите механички пресметки ќе се среќаваме со две врсти на зимските додатни товари:

- нормален зимски додатен товар (НЗДТ) и
- исклучителен зимски додатен товар (ИЗДТ).

За *нормален зимски додатен товар*, според правилникот [1], се зема најголемиот зимски додатен товар што на предметното место од трасата се појавува просечно еднаш на пет години (и овде се зема статистички определена вредност на додатниот товар со 20% веројатност на настанување), но во секој случај не помалку од величината g , наречена „основен зимски додатен товар“ е дефинирана со следната релација

$$g = 0,18 \cdot \sqrt{d} , \quad (6.5)$$

Во неа со d е означен пречникот на спроводникот / јажето, изразен во mm, и притоа величината g се добива во daN/m.

За проценка на додатниот товар што се зема при механичката пресметка на водот, се користат податоците што се добиваат од хидрометеоролошката служба и измерените вредности на додатните товари врз постојните надземни електроенергетски и телекомуникациски (ТК) водови долж проектираната траса. По правило, треба да се смета со една од следните 4 вредности за зимскиот додатен товар:

$$1,0 \cdot g \quad 1,6 \cdot g \quad 2,5 \cdot g \quad 4,0 \cdot g . \quad (6.6)$$

Правилникот [1] допушта за големината на нормалниот зимски додатен товар да се усвои и вредност што се разликува од претходно наведените. Во секој случај усвоената вредност не може да биде помала од вредноста $1,0 \cdot g$.

Како *исклучителен зимски додатен товар* се зема најголемиот зимски додатен товар којшто во предметниот регион се појавува просечно на секои 20 години а кој во секој случај не ќе е помал од двојната вредност на нормалниот зимски додатен товар (ризикот во овој случај дека во дадениот временски период од 20 години ќе биде надмината вредноста на ИЗДТ, ќе изнесува само 5%).

Во некои подрачја силите од притисокот на ветерот можат да бидат многу големи а зимските додатни товари да бидат мали. Во случајот кога резултантата G' од притисокот на ветерот и од тежината на незамрзнатиот спроводник (јаже) е поголема од тежината \bar{G} на спроводникот (јажетото) заедно со ИЗДТ, како исклучителен зимски додатен товар ќе треба да се земе поголемата од двете споменати вредности. Резултантата G' , притоа, се пресметува со помош на релацијата (6.7):

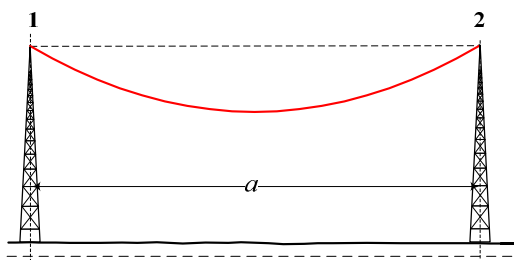
$$G' = \sqrt{G^2 + F_V^2} . \quad (6.7)$$

Во релацијата (6.7), со G е означена сопствената тежина по единица должина на спроводникот (јажетото), додека со F_V е означена силата по единица должина со која ветерот со својот максимален притисок дејствува (хоризонтално) врз спроводникот (јажетото).

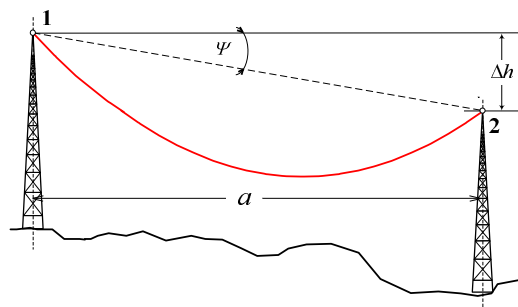
6.2 МЕХАНИЧКА ПРЕСМЕТКА НА СПРОВОДНИЦИТЕ

Хоризонталното растојание помеѓу два соседни столба од еден надземен вод се нарекува *распон*. Распонот може да биде хоризонтален (слика 6.3.а) и кос (слика 6.3.б). Распонот е хоризонтален кога обете точки на зацврстување (обесување) се наоѓаат на иста височина. Во спротивно, кога помеѓу нив постои определена висинска разлика Δh , наречена *денивелација*, распонот е кос.

Спроводниците кај далекуводите се преку изолаторите прицврстени за електричните столбови. Затегнатиот спроводник помеѓу точките на обесување не зазема во просторот облик на права линија, туку под дејство на сопствената тежина како и тежината на зимскиот додатен товар (доколку го има), тој ќе добие облик на *синџирница* (*верижник* или *ланчаница*). Големината на *провесот* f во даден распон a , зависи од силата на затегање F , односно напрегањето σ со кое е спроводникот затегнат. Колку е силата (односно напрегањето) на затегање поголема, толку ќе биде помал провесот – и обратно.



Слика 6.3.а Хоризонтален распон



Слика 6.3.б Кос распон

Температурата, исто така, има влијание врз обликот на синџирницата. Со порастот на температурата на спроводникот, тој постепено се издолжува поради што напрегањето σ се намалува, а провесот се зголемува. Намалувањето на температурата на спроводникот ќе предизвика спротивни ефекти врз синџирницата.

Механичките пресметки на спроводниците и заштитните јажиња во далекуводната техника се вршат со едни исти методи, поради што тие од сега натаму ќе бидат обединети во третманот со едно заедничко име – спроводници. Пресметките што овде

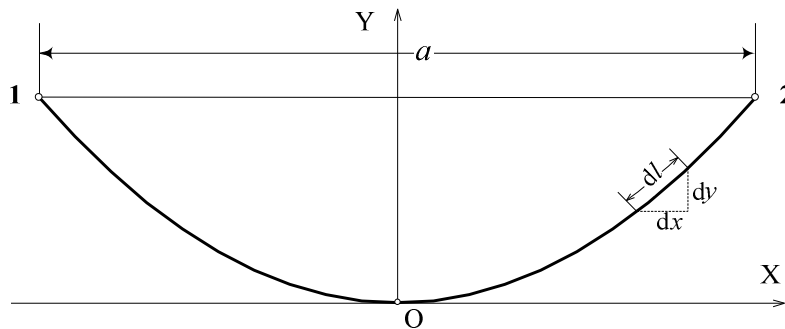
ќе се спроведуваат, ќе бидат донекаде идеализирани, бидејќи тие се темелат на примената на теоријата на идеално совитливи тешки нишки. Значи спроводниците, кои не се идеално совитливи и кои имаат определени, конечно мали напречни димензии, во пресметките ќе се третираат како идеално совитливи линиски творби од точкести маси. Исто така, ќе претпоставуваме дека единичната тежина на спроводникот p , без оглед дали постои зимски додатен товар или не, е еднаква во сите точки од распонот, т.е. таа е константна.

6.2.1 Синцирница и парабола

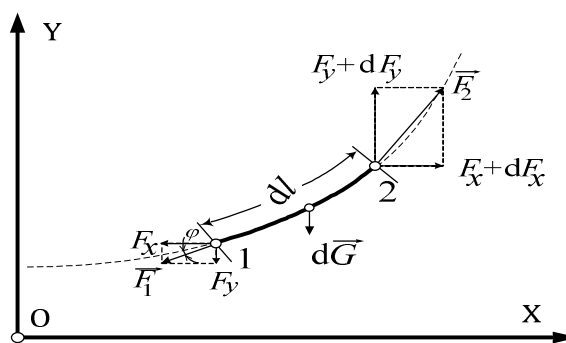
Геометрискиот облик на спроводниците во просторот, т.е. равенката на провесната крива на спроводникот се изведува од условот за рамнотежа на секој негов елементарен сегмент.

Ќе посматраме спроводник со познат напречен пресек A и позната специфична тежина p , затегнат во хоризонтален распон a (слика 6.4а). Нека почетокот на координатниот систем XOY го поставиме во најниската точка од провесната крива, наречена *теме*.

Посматраме дел од спроводникот со елементарна должина dl (сл. 6.4 б). Неговата тежина ќе изнесува $dG = G \cdot dl = p \cdot A \cdot dl$. Бидејќи сегментот dl се наоѓа во состојба на мирување, тоа ќе значи дека векторскиот збир на силите што делуваат врз него (слика 6.4) е еднаков на нула.



Слика 6.4 а



Слика 6.4 б

Делот од провесната крива што се наоѓа одлево од сегментот dl , ќе дејствува врз него со сила F_1 која има своја хоризонтална компонента F_x и своја вертикална компонента F_y . Правецот на дејствување на силата F_1 врз сегментот dl се поклопува со

правецот на тангентата на провесната крива во точката „1“. Делот од провесната крива десно од елементот dl , пак, ќе дејствува врз него со сила F_2 која се разликува од силата F_1 и по интензитет и по насока. Притоа, во општ случај ќе имаме:

$$\vec{F}_1 = F_x \cdot \vec{i}_x + F_y \cdot \vec{i}_y;$$

$$\vec{F}_2 = (F_x + dF_x) \cdot \vec{i}_x + (F_y + dF_y) \cdot \vec{i}_y;$$

И конечно, врз сегментот конечно ќе дејствува и силата на неговата сопствена тежина $dG = p \cdot A \cdot dl$ која е насочена вертикално надолу.

Од условот за рамнотежа на силите што делуваат врз сегментот dl , произлегуваат следните релации кои што се однесуваат на нивните компоненти по оските X и Y:

$$\Sigma x = 0: -F_x + F_x + dF_x = 0, \quad (6.10 \text{ a})$$

$$\Sigma y = 0: -F_y - p \cdot A \cdot dl + F_y + dF_y = 0. \quad (6.10 \text{ b})$$

Понатаму следува:

$$dF_x = 0, \quad (6.11 \text{ a})$$

$$dF_y = p \cdot A \cdot dl. \quad (6.11 \text{ b})$$

Со оглед на релациите:

$$\sigma_x = F_x / A; \quad (6.12 \text{ a})$$

$$\sigma_y = F_y / A; \quad (6.12 \text{ b})$$

$$\sigma' = F / A \quad (6.12 \text{ v})$$

и со оглед на диференцијалните релации (6.11 а, б), добиваме:

$$d\sigma_x = 0, \quad (6.13 \text{ a})$$

$$d\sigma_y = p \cdot dl. \quad (6.13 \text{ б})$$

Во релациите (6.12 а, б, в) и (6.13 а, б) се воведени следните означувања:

σ_x – хоризонтална компонента на напрегањето на затегање на спроводникот;

σ_y – вертикална компонента на напрегањето на затегање на спроводникот;

$\sigma' = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2}$ – вкупно напрегање на затегање на спроводникот.

Од равенката од (6.13 а) произлегува следната релација:

$$\sigma_x = \sigma = \text{const.} \quad (6.14)$$

Таа вели дека хоризонталната компонента на напрегањето σ_x односно на силата на затегање F_x во било која точка од синцирницата е константна, независно од нејзината координата x .

За елементот dl од провесната крива прикажана на сликата (6.3), во општ случај важи:

$$dl = \sqrt{dx^2 + dy^2} = dx \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2}. \quad (6.15)$$

Ако изразот за dl од (6.15) го замениме во равенката (6.13 б), ќе ја добиеме следната диференцијална равенка која се однесува на вертикалната компонента на напрегањето на затегањето σ_y .

$$\frac{d\sigma_y}{dx} = p \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2}. \quad (6.16)$$

Понатаму, од сликата (6.4 б) следуваат односите:

$$\frac{dy}{dx} = \frac{F_y}{F_x} = \operatorname{tg} \varphi, \quad (6.17)$$

од каде се добива:

$$\frac{\sigma_y}{\sigma_x} = \frac{F_y}{F_x} = \frac{dy}{dx}, \quad (6.18)$$

односно:

$$\sigma_y = \sigma_x \cdot \frac{dy}{dx}. \quad (6.19)$$

Со диференцирање на обете страни од изразот (6.19), уважувајќи ја притоа релацијата (6.14), се добива:

$$\frac{d\sigma_y}{dx} = \sigma_x \cdot \frac{d^2y}{dx^2} = \sigma \cdot \frac{d^2y}{dx^2}, \quad (6.20)$$

или со оглед на (6.16), се добива конечниот облик на диференцијалната равенка со која е опишан обликот на провесната крива:

$$\sigma \cdot \frac{d^2y}{dx^2} = p \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2}. \quad (6.21)$$

Равенката (6.21) претставува диференцијална равенка од втор ред. Нејзиниот општ интеграл гласи:

$$y = \frac{\sigma}{p} \cdot \operatorname{ch} \frac{p \cdot x}{\sigma} + K. \quad (6.22)$$

Вредноста на интеграционата константа K ќе ја добиеме од почетните услови со кои е дефинирана положбата на темето од провесната крива во координатниот систем ХОУ: за $x = 0 \Rightarrow y = 0$, од каде што следи дека треба да биде $K = -\sigma/p$, па според тоа, релацијата (6.22) ќе го добие својот конечен облик:

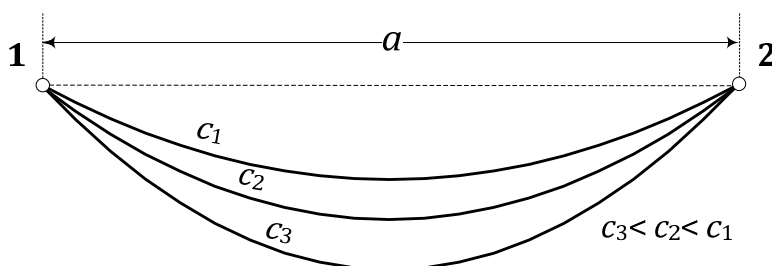
$$y = c \cdot \left(\operatorname{ch} \frac{x}{c} - 1\right). \quad (6.23)$$

Значи, провесната крива на спроводник, затегнат во хоризонтален распон е опишана со една хипербилична функција којашто во механиката се нарекува *синџирница* (*ланчаница*, *верижник*).

Во равенката на синџирницата (6.23) е воведена величината c којашто е дефинирана со релацијата (6.24)

$$c = \frac{\sigma}{p}. \quad (6.24)$$

и се нарекува *параметар на синџирницата*. Параметарот c има природа на должина и се изразува во метри, m. Колку е параметарот c на синџирницата помал, толку е спроводникот полабаво затегнат, а синџирницата е подлабока – и обратно.



Синџирницата (6.23) претставува парна функција, т.е. таа е симетрична во однос на Y -оската.

Обликот на провесната крива (6.23) е општ, независно од големината на напрегањето σ или распонот a . Меѓутоа, кога распонот a е релативно мал (до сса 400 m), тогаш таа може приближно, но сепак доволно точно, да се опише со една парабола.

До изразот на провесната крива во форма на парабола се доаѓа кога хиперболичниот косинус од (6.23) се развие во бесконечен ред, и притоа се земат само првите два негови члена:

$$\operatorname{ch}\left(\frac{x}{c}\right) = 1 + \frac{1}{2!} \cdot \left(\frac{x}{c}\right)^2 + \frac{1}{4!} \cdot \left(\frac{x}{c}\right)^4 + \frac{1}{6!} \cdot \left(\frac{x}{c}\right)^6 + \dots \quad (6.25)$$

или:

$$\operatorname{ch}\left(\frac{x}{c}\right) \approx 1 + \frac{1}{2!} \cdot \left(\frac{x}{c}\right)^2, \quad (6.26)$$

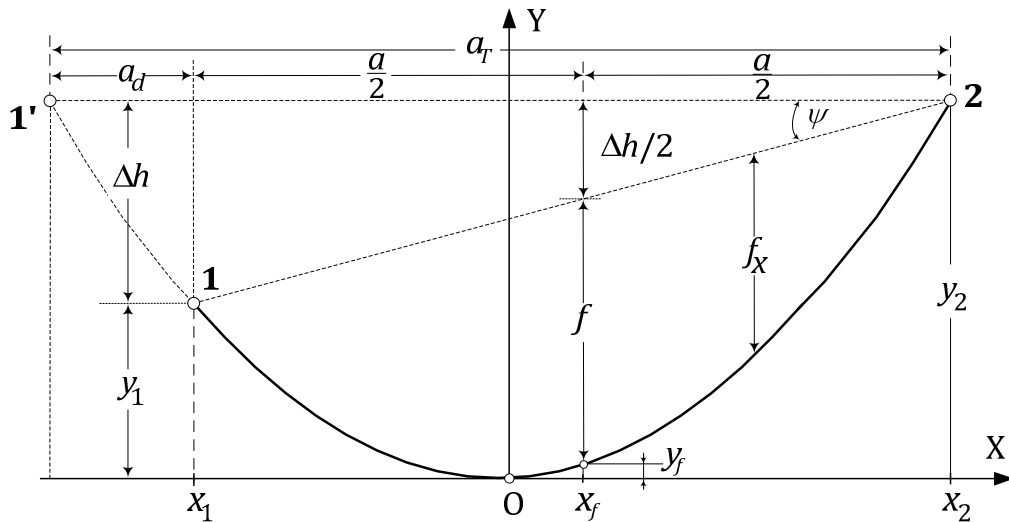
па провесната крива (6.23) ќе го добие својот упростен облик на парабола:

$$y = \frac{x^2}{2c} = \frac{p \cdot x^2}{2\sigma}. \quad (6.27)$$

6.2.2 Синџирница во кос распон

Далекуводите минуваат низ разни терени, и најчесто точките на обесување на спроводниците во одделните распони се наоѓаат на различни височини. Во тој случај станува збор за коси распони па затоа, од интерес е да се утврди каков ќе биде обликот на провесната крива во еден кос распон.

На сликата 6.5 е прикажана синџирницата 1'-0-1 во еден хоризонтален распон. Обликот на спроводникот во распонот од сликата 6.5 нема воопшто да се измени ако при неизменето напрегање σ , левата точка на зацрстување се пренесе од точката "1'" во точката "1", и делот од синџирницата помеѓу точките "1" и "1'" се отстрани. Од овде произлегува дека синџирницата на спроводникот во еден кос распон може да се посматра (третира) како дел (сегмент) од некоја друга синџирница (со ист параметар c), затегната во еден поголем, хоризонтален, распон.



Слика 6.5 Синџирница во кос распон

Хоризонталниот распон за кој што станува збор во овој случај (слика 6.4), се нарекува *тотален распон* a_T .

Синџирницата во тоталниот распон, значи, ќе ја добиеме по графички пат на тој начин што синџирницата од косиот распон a ќе ја надополниме со делот од синџирницата „1“ – „1'“ (нацртан на сликата 6.5 со испрекинатата линија), користејќи ја притоа нејзината особина што е таа симетрична во однос на Y -оската.

Додатниот дел од распонот со кој треба да се надополни косиот распон a за да се добие тоталниот распон a_T , ќе го нарекуваме *фиктивен додаток* a_d . Неговата вредност можеме да ја добиеме и по аналитички пат. За таа цел, ќе постапиме на следниот начин.

Од изразот за синџирница (6.24), во склад со сликата 6.4 добиваме:

$$\text{за } x = x_1 \quad y = y_1 = c \cdot \left(\operatorname{ch} \frac{x_1}{c} - 1 \right); \quad (6.28.a)$$

$$\text{за } x = x_2 \quad y = y_2 = c \cdot \left(\operatorname{ch} \frac{x_2}{c} - 1 \right); \quad (6.28.б)$$

$$\Delta h = y_2 - y_1 = c \cdot \operatorname{ch} \frac{x_2}{c} - c \cdot \operatorname{ch} \frac{x_1}{c}. \quad (6.28.в)$$

Врз основа на познатата адициона теорема за хиперболичниот косинус:

$$\operatorname{ch} b - \operatorname{ch} a = 2 \cdot \operatorname{sh} \frac{b-a}{2} \cdot \operatorname{sh} \frac{b+a}{2},$$

релацијата (6.28 в) ќе го добие следниот облик:

$$\Delta h = 2c \cdot \operatorname{sh} \frac{x_2 - x_1}{2c} \cdot \operatorname{sh} \frac{x_2 + x_1}{2c}. \quad (6.29)$$

Бидејќи е $x_2 - x_1 = a$ и $x_2 + x_1 = a_d$, следи:

$$\Delta h = 2c \cdot \operatorname{sh} \frac{a}{2c} \cdot \operatorname{sh} \frac{a_d}{2c}, \quad (6.30)$$

од каде што се добива:

$$\operatorname{sh} \frac{a_d}{2c} = \frac{\Delta h / 2c}{\operatorname{sh}(a / 2c)} = \xi, \quad (6.31)$$

и конечно:

$$a_d = 2c \cdot \operatorname{Arsh}(\xi) = 2c \cdot \ln(\xi + \sqrt{\xi^2 + 1}) . \quad (6.32)$$

По определувањето на големината на фиктивниот додаток a_d , лесно се пресметува големината на тоталниот распон a_T :

$$a_T = a + a_d . \quad (6.33)$$

Кај вообичаените коси распони со нормална должина (до 400 m), и со мала денивелација Δh , вредноста на фиктивниот додаток a_d може да се пресмета и приближно, но на многу поедноставен начин.

Ако хиперболичните синуси во (6.31) се апроксимираат со вредностите на своите аргументи, т.е:

$$\operatorname{sh} \frac{a_d}{2c} \approx \frac{a_d}{2c} \quad \text{и} \quad \operatorname{sh} \frac{a}{2c} \approx \frac{a}{2c} ,$$

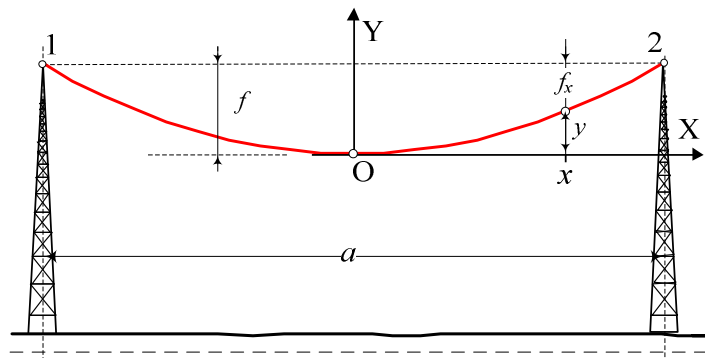
тогаш, врз основа на (6.31) ќе се добие следната сосема едноставна релација:

$$a_d \approx 2c \cdot \frac{\Delta h}{a} . \quad (6.34)$$

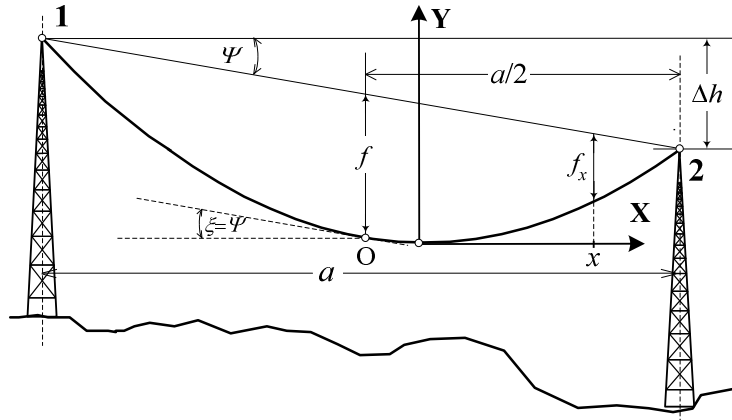
Врз основа на изнесеното во оваа точка можеме да го заклучиме следното. Решавањето на еден кос распон всушност се сведува на решавање на еден хоризонтален распон. За таа цел, најнапред со помош на релациите (6.32) односно (6.34) се пресметува големината на фиктивниот додаток a_d , а потоа, со (6.33) се пресметува и големината на тоталниот распон a_T . Сите натамошни пресметки коишто се однесуваат на обликот и позицијата на синџирницата од косиот распон во просторот, сега ќе можат да се изведуваат на нејзината замена – хоризонталната синџирницата во тоталниот распон, со помош на изразите коишто важат за хоризонталните распони.

6.2.3 Провес на спроводникот

Вертикалното растојание помеѓу правата што ги сврзува точките на зацврстување на спроводникот и синџирницата е најголемо во средината од распонот. Тоа растојание се нарекува провес на спроводникот во средината од распонот или само *провес*, и се означува со f . Провесот на спроводникот во било која друга точка од распонот со апсциса x ќе го означуваме со f_x (слики 6.6 и 6.7).



Слика 6.6 Дефиниција на провес во хоризонтален распон



Слика 6.7 Дефиниција на провес во кос распон

За хоризонталните распони (слика 6.6), врз основа на (6.23) добиваме:

$$f = c \cdot \left(\operatorname{ch} \frac{a}{2c} - 1 \right), \quad (6.35)$$

и:

$$f_x = f - c \cdot \left(\operatorname{ch} \frac{x}{c} - 1 \right) = c \cdot \operatorname{ch} \frac{a}{2c} - c \cdot \operatorname{ch} \frac{x}{c}, \quad (6.36)$$

т.е.

$$f_x = 2c \cdot \operatorname{sh} \frac{(a/2 - x)}{2c} \cdot \operatorname{sh} \frac{(a/2 + x)}{2c} \quad (6.37)$$

Релациите (6.35)...(6.37) се егзактни бидејќи се темелат на синцирницата како математичка формулација на провесната крива. Тие важат секогаш, без оглед на големината на распонот a . Меѓутоа во праксата, од практични причини, за пресметувањето на провесот f се користат упростени изрази.

Упростувањата што притоа се прават се темелат врз фактот дека кај реалните распони секогаш важи:

$$\frac{a}{2c} \ll 1,$$

па со оглед на тоа, хиперболичниот косинус од (6.35), развиен во ред, ќе може да се апроксимира со конечен број членови од редот, т.е:

$$\operatorname{ch} \frac{a}{2c} = 1 + \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{a}{2c} \right)^2 + \frac{1}{24} \cdot \left(\frac{a}{2c} \right)^4 + \frac{1}{720} \cdot \left(\frac{a}{2c} \right)^6 + \dots \approx 1 + \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{a}{2c} \right)^2.$$

Земајќи ги само првите два члена од редот, за провесот f ќе добиеме:

$$f \approx c \cdot \left(1 + \frac{a^2}{8c^2} - 1 \right) = \frac{a^2}{8c}, \quad (6.38)$$

или, со оглед на (6.24):

$$f \approx \frac{p \cdot a^2}{8\sigma}. \quad (6.39)$$

Доколку хиперболичниот косинус го апроксимираме со првите три члена од редот, ќе добиеме посложена, но затоа многу поточна (всушност доволно точна) релација за пресметка на провесот f :

$$f \approx \frac{a^2}{8c} + \frac{a^4}{384c^3} = \frac{p \cdot a^2}{8\sigma} + \frac{p^3 \cdot a^4}{384\sigma^3} . \quad (6.40)$$

На сличен начин, воведувајќи ја апроксимацијата $\text{sh } z \approx z$ во изразот (6.37) за пресметка на провесот f_x во произволна точка од синцирницата со апсциса x , ќе добиеме:

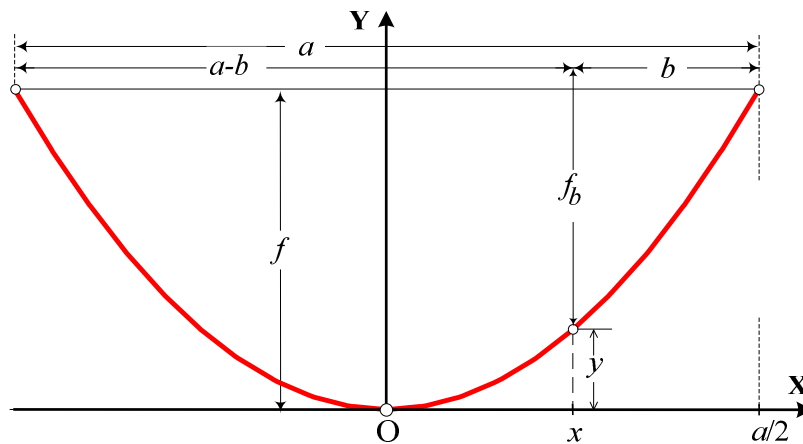
$$f_x \approx 2c \cdot \frac{(a/2-x)}{2c} \cdot \frac{(a/2+x)}{2c} = \frac{(a/2-x) \cdot (a/2+x)}{2c} . \quad (6.41)$$

Доколку во (6.41) ја воведеме смената $b = a/2 - x$, (види сл. 6.8), тогаш изразот (6.41) ќе добие нов, погоден облик, кој е во склад со сликата 6.8:

$$f_x \approx f_b = \frac{b \cdot (a-b)}{2c} , \quad (6.42 \text{ a})$$

или со оглед на (6.38)

$$f_b \approx 4f \cdot \frac{b \cdot (a-b)}{a^2} . \quad (6.42 \text{ б})$$



Слика 6.8 Провес во произволна точка од синцирницата

Со кои формули ќе ги пресметуваме провесите f и f_x , ќе зависи од потребната точност во пресметките. Кај помалите распони е можно да се применуваат и приближните формули (6.38) односно (6.39), кај кои синцирницата е апроксимирана со парабола. Така, на пример, грешките при пресметувањето на провесот со овие формули се помали од 1% доколку провесот на спроводникот f е под 6% од должината на распонот a . Во тие случаи, примената на упростените релации (6.38) и (6.39) е сосема прифатлива. Во останатите случаи, препорачливо е да се користи изворната релација (6.35).

Пресметувањето на провесите f и f_x кај косите распони во принцип се изведува како и кај хоризонталните распони, при што, место со вистинскиот кос распон, ќе се оперира со тоталниот распон a_T , добиен на начинот изложен во точката 6.2.2. Приближната вредност на провесот f во средината од косиот распон a (сл. 6.6), може да се пресмета со помош на следните релации [3]:

$$f = c \cdot \left(\operatorname{ch} \frac{a}{2c} - 1 \right) \cdot \frac{1}{\cos \psi} , \quad (6.43)$$

или приближно:

$$f = \frac{a^2}{8c} \cdot \frac{1}{\cos \psi} = \frac{p \cdot a^2}{8\sigma} \cdot \frac{1}{\cos \psi} . \quad (6.44)$$

Во овие релации, покрај веќе познатите величини фигурира и *аголот на наклон* Ψ помеѓу правата што ги сврзува точките на зацврстување на спроводниците и хоризонталата, како што е тоа прикажано на сликите 6.5 и 6.7.

6.2.4 Должина на спроводникот во распонот

Под должина на спроводникот во распонот всушност се подразбира должината на синцирницата помеѓу точките на зацврстување.

Ќе посматраме најнапред спроводник во хоризонтален распон, (слика 6.3). Според дадената дефиниција, должината l' на спроводникот, сметано од темето на синцирницата до едната точка на зацврстување, ќе изнесува:

$$l' = \int_0^{a/2} dl = \int_0^{a/2} \sqrt{1 + (dy/dx)^2} \cdot dx , \quad (6.45)$$

Со оглед на равенката на синцирницата (6.24), се добива:

$$\frac{dy}{dx} = \operatorname{sh} \frac{x}{c} , \quad (6.46)$$

од каде што следи:

$$l' = \int_0^{a/2} \sqrt{1 + \operatorname{sh}^2 \frac{x}{c}} \cdot dx = \int_0^{a/2} \operatorname{ch} \frac{x}{c} \cdot dx , \quad (6.47)$$

и конечно:

$$l' = c \cdot \operatorname{sh} \frac{a}{2c} . \quad (6.48)$$

Вкупната должина на спроводникот во распонот според тоа ќе биде:

$$l = 2l' = 2c \cdot \operatorname{sh} \frac{a}{2c} . \quad (6.49)$$

Со оглед на (6.48), должината на синцирницата во распонот кај косите распони (слика 6.6) ќе биде:

$$l = \int_{x_1}^0 dl + \int_0^{x_2} dl = -c \cdot \operatorname{sh} \frac{x_1}{c} + c \cdot \operatorname{sh} \frac{x_2}{c} = c \cdot \operatorname{sh} \frac{x_2}{c} - c \cdot \operatorname{sh} \frac{x_1}{c} \quad (6.50)$$

Ако хиперболичниот синус во (6.49) го развиеме во ред и го апроксимираме со првите два члена од редот, ќе добиеме:

$$l = 2c \cdot \left[\left(\frac{a}{2c} \right) + \frac{1}{3!} \cdot \left(\frac{a}{2c} \right)^3 \right] = a + \frac{a^3}{24c^2} , \quad (6.51)$$

или:

$$l = a \cdot \left(1 + \frac{a^2}{24c^2}\right) = a \cdot \left(1 + \frac{p^2 \cdot a^2}{24\sigma^2}\right) = a + \frac{8}{3a} \cdot \left(\frac{p^2 \cdot a^4}{64 \sigma^2}\right) \quad (6.52)$$

Имајќи ја предвид релацијата за провес (6.39), последната формула може да се напише и на следниот начин:

$$l = a + \frac{8}{3} \cdot \frac{f^2}{a} \quad (6.53)$$

Во врска со должината на синцирницата, се воведува и поимот *релативна отпуштеност* на синцирницата λ , дефиниран на следниот начин:

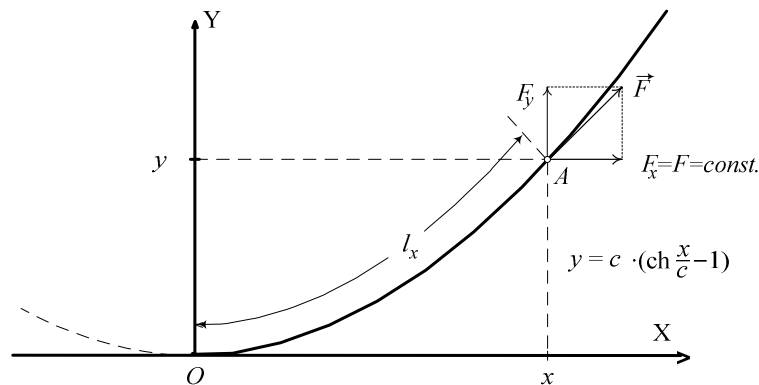
$$\lambda = \frac{l-a}{a} = \frac{8}{3} \cdot \frac{f^2}{a^2} = \frac{p^2 \cdot a^2}{24\sigma^2} \quad (6.54)$$

Од последната релација заклучуваме дека разликата помеѓу должината спроводникот l и должината на распонот a е најчесто сосема мала. Оваа разлика ќе биде под 1% доколку провесот f е под 6% од должината на распонот a .

Приближните формули (6.51)...(6.53) за пресметување на должината на синцирницата, се доволно точни за распони до 500 m, со агли на наклон $\Psi < 30^\circ$. Кај поголемите и пострмните распони, ќе треба да се користат егзактните формули (6.49) и (6.50).

6.2.5 Напрегање на затегање во различни точки од синцирницата

Во согласност со релацијата (6.48), должината на сегментот од синцирницата помеѓу темето O и некоја нејзина точка $A(x,y)$ (слика 6.9), ќе изнесува:



Слика 6.9

$$l_x = \int_0^x \text{ch} \frac{x}{c} \cdot dx = c \cdot \text{sh} \frac{x}{c} \quad (6.55)$$

додека тежината G_x на посматраниот сегмент l_x ќе биде:

$$G_x = G \cdot l_x = p \cdot A \cdot l_x \quad (6.56)$$

Сегментот l_x од синцирницата ќе дејствува врз точката A со некоја сила F , која има хоризонтална компонента $F_x = \sigma_x \cdot A$ и вертикална компонента $F_y = \sigma_y \cdot A$. Хоризонталната компонента F_x од силата е, според (6.14), константна во било која точка од синцирницата,

$$F_x = \sigma_x \cdot A = \sigma \cdot A , \quad (6.57)$$

додека вертикалната компонента F_y ќе биде еднаква на тежината G_x на посматраниот сегмент, т.е:

$$F_y = G_x = p \cdot A \cdot l_x = p \cdot A \cdot c \cdot \text{sh}(x/c) . \quad (6.58)$$

Со делење на обете страни од (6.58) со пресекот A , се добива:

$$\sigma_y = p \cdot l_x = p \cdot c \cdot \text{sh}(x/c) , \quad (6.59)$$

или со оглед на (6.24), добиваме:

$$\sigma_y = \sigma \cdot \text{sh}\left(\frac{x}{c}\right) . \quad (6.60)$$

Вкупното напрегање σ' во посматраната точка “А” ќе биде:

$$\sigma' = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2} = \sigma \cdot \sqrt{1 + \text{sh}^2(x/c)} , \quad (6.61)$$

т.е:

$$\sigma' = \sigma \cdot \text{ch}\left(\frac{x}{c}\right) \quad (6.62)$$

Напрегањето σ' може да се пресмета и на поинаков начин. Бидејќи равенката на синцирницата (6.23) гласи:

$$y = c \cdot \left[\text{ch} \frac{x}{c} - 1 \right] ,$$

следува:

$$\text{ch} \frac{x}{c} = \frac{y}{c} + 1 = \frac{p \cdot y}{\sigma} + 1 . \quad (6.63)$$

Заменувајќи го последниот израз во (6.62), ќе добиеме:

$$\sigma' = \sigma \cdot \left(\frac{p \cdot y}{\sigma} + 1 \right) = \sigma + p \cdot y . \quad (6.64)$$

Од изведените релации (6.62) и (6.64) произлегува дека вкупното напрегање на затегање σ' ќе биде најмало во темето од синцирницата:

$$\sigma'_0 = \sigma , \quad (6.65)$$

и тоа ќе биде еднакво на хоризонталната компонента σ на напрегањето, додека вкупното напрегање е најголемо во точките на обесување „1“ и „2“ (сл. 6.10), при што важи:

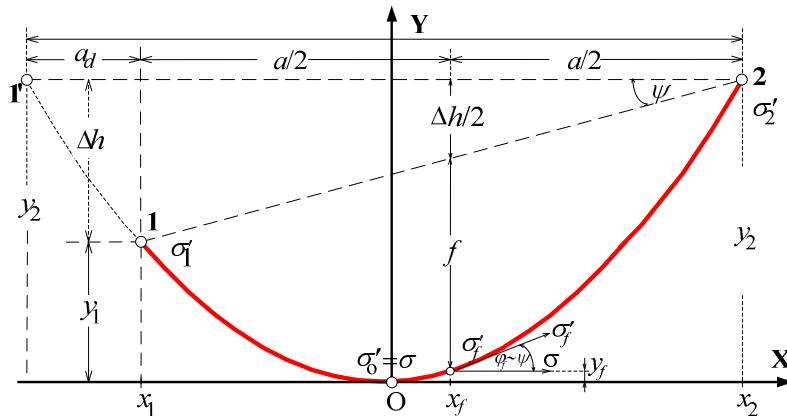
$$\sigma'_1 = \sigma + p \cdot y_1 \quad (6.66)$$

$$\sigma'_2 = \sigma + p \cdot y_2 . \quad (6.67)$$

Равенките (6.66) и (6.67) се едноставни но неподесни за директна примена бидејќи во нив фигурираат координатите y_1 и y_2 . Многу е позгодно ако за пресметувањето на вкупните напрегања σ'_1 и σ'_2 директно се користат познатите величини a , Δh и Ψ .

За таа цел нека најнапред ќе се определи и вкупното напрегање σ'_f во средината од распонот (слика 6.10). Во согласност со сликата 6.10, ова напрегање ќе изнесува:

$$\sigma'_f = \frac{\sigma}{\cos \varphi_f}. \quad (6.68)$$



Слика 6.10 Напрегање на затегање во кос распон

Бидејќи тангентата на синцирницата во средината од распонот е практично паралелна со правата 1 – 2 што ги сврзува точките на зацврстување „1“ и „2“, ќе биде:

$$\psi \approx \varphi_f \Rightarrow \cos \varphi_f \approx \cos \psi, \quad (6.69)$$

од каде што се добива:

$$\sigma'_f = \frac{\sigma}{\cos \psi}. \quad (6.70)$$

Сега, напрегањата σ'_1 и σ'_2 можеме да ги пресметуваме и на поинаков начин. Од сликата 6.10 се добиваат следните односи:

$$y_2 = y_f + f + \frac{\Delta h}{2}, \quad (6.71)$$

$$y_1 = y_2 - \Delta h = y_f + f - \frac{\Delta h}{2}. \quad (6.72)$$

Врз основа на последните две релации, и имајќи ги притоа предвид релациите (6.66) и (6.67), добиваме:

$$\begin{aligned} \sigma'_1 &= \sigma + p \cdot (y_f + f - \Delta h / 2) = (\sigma + p \cdot y_f) + p \cdot (f - \Delta h / 2) \\ \sigma'_2 &= \sigma + p \cdot (y_f + f + \Delta h / 2) = (\sigma + p \cdot y_f) + p \cdot (f + \Delta h / 2) \end{aligned} \quad (6.73)$$

Според општата релација (6.64), може да се пишува:

$$\sigma'_f = \sigma + p \cdot y_f \quad (6.74)$$

па имајќи ја предвид релацијата (6.68) те. (6.70), конечно добиваме:

$$\sigma'_1 = \frac{\sigma}{\cos \psi} + p \cdot \left(f - \frac{\Delta h}{2} \right) \quad \text{и} \quad \sigma'_2 = \frac{\sigma}{\cos \psi} + p \cdot \left(f + \frac{\Delta h}{2} \right). \quad (6.75)$$

Пример 6.1. Се посматра хоризонтален распон $a = 300$ m. Спроводниците во распонот се комбинирани Al/Џ јажиња $240/40$ mm², за кои се познати следните податоци:

$$A = 282,5 \text{ mm}^2; G = 968 \text{ daN/m}; d = 21,9 \text{ mm}; E = 7700 \text{ daN/mm}^2; \alpha = 18,9 \cdot 10^{-6} \text{ 1/}^\circ\text{C};$$

$$p = G/A = 3,426 \cdot 10^{-3} \text{ daN/m,mm}^2.$$

Обете точки на обесување „1“ и „2“ се наоѓаат на иста висина над тлото $h_1 = h_2 = 17,3$ m. Во состојбата при температура на спроводниците $\theta = 40^\circ\text{C}$ хоризонталната компонента на напрегањето на спроводниците изнесува $\sigma_x = \sigma = 3,669 \text{ daN/mm}^2$. Да се пресмета:

- а) провесот на спроводниците f ;
- б) вертикалната компонента на напрегањето σ_y како и вкупното (резултантно) напрегање σ' во точките на обесување;
- в) должината на синцирницата во распонот l ;

Пресметките да се направат најнапред со точните, а потоа со приближните формули. Да се коментираат добиените резултати во поглед на точноста.

Решение:

Најнапред, за посматраната состојба ($\theta = +40^\circ\text{C}$), ќе го пресметаме параметарот на синцирницата c :

$$c = \frac{\sigma}{p} = \frac{3,669}{3,426 \cdot 10^{-3}} = 1071 \text{ m.}$$

а) *Провес во распонот*

Точната вредност на провесот f ќе ја пресметаме со помош на релацијата (6.35)

$$f = c \cdot \left(\operatorname{ch} \frac{a}{2c} - 1 \right) = 1071 \cdot \left(\operatorname{ch} \frac{300}{2 \cdot 1071} - 1 \right) = 10,522 \text{ m.}$$

Приближната вредност на провесот f_{\approx} ќе ја добиеме со помош на равенката (6.39):

$$f_{\approx} = \frac{p \cdot a^2}{8 \cdot \sigma} \equiv \frac{a^2}{8 \cdot c} = \frac{300^2}{8 \cdot 1071} = 10,505 \text{ m,}$$

што значи дека е направена грешка од 1,7 cm, т.е. од само $-0,16\%$. Тоа упатува на заклучокот дека за вообичаените големини на распоните ($a \leq 400$ m) приближната формула (6.39) дава резултати со сосема задоволителна точност.

б) *Напрегања во јажето σ_y и σ'*

Вертикалната компонента σ_y во точките на обесување ($x = a/2 = 150$ m), според релацијата (6.60) ќе биде:

$$\sigma_y = \sigma_x \cdot \operatorname{sh} \left(\frac{x}{c} \right) = 3,669 \cdot \operatorname{sh} \left(\frac{150}{1071} \right) = 0,516 \frac{\text{daN}}{\text{mm}^2}.$$

Вкупното (резултантно) напрегање σ' , според (6.62) ќе биде:

$$\sigma' = \sigma_x \cdot \operatorname{ch}\left(\frac{x}{c}\right) = \sigma_x \cdot \operatorname{ch}\left(\frac{a}{2c}\right) = 3,669 \cdot \operatorname{ch}\left(\frac{150}{1071}\right) = 3,705 \frac{\text{daN}}{\text{mm}^2}.$$

Според релацијата (6.64), за вкупното напрегање σ' ќе добиеме:

$$\sigma' = \sigma_x + p \cdot y = \sigma_x + p \cdot f = 3,669 + 3,426 \cdot 10^{-3} \cdot 10,522 = 3,705 \frac{\text{daN}}{\text{mm}^2}.$$

Значи го добивме истиот резултат, што е за очекување бидејќи и обете формули се егзактни и произлегуваат една од друга.

в) Должина на синџирницата во распонот l

Според релацијата (6.49) должината на синџирницата во распонот l (егзатна вредност) ќе биде:

$$l = 2c \cdot \operatorname{sh}\left(\frac{a}{2c}\right) = 2 \cdot 1071 \cdot \operatorname{sh}\left(\frac{150}{1071}\right) = 300,982 \text{ m.}$$

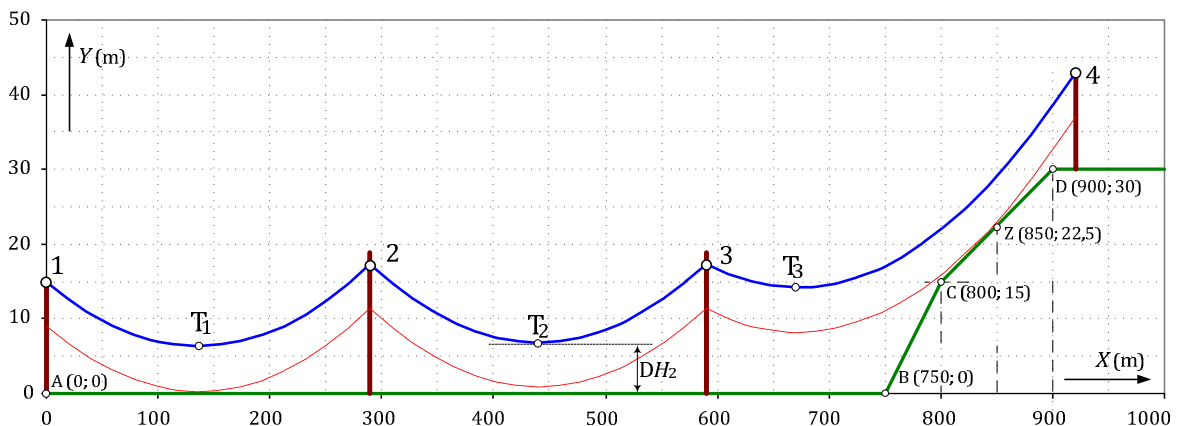
додека според приближната релација (6.51) таа ќе изнесува:

$$l = a \cdot \left(1 + \frac{a^2}{24c^2}\right) = a \cdot \left(1 + \frac{p^2 \cdot a^2}{24\sigma^2}\right) = 300 \cdot \left(1 + \frac{300^2}{24 \cdot 1071^2}\right) = 300,981 \text{ m.}$$

Гледаме дека и во овој случај разликата помеѓу точната и приближната вредност е безначајна.



Пример 6.2. На сликата П.6.2.1 е прикажано затезно поле од еден 110 kV далекувод коешто се состои од три распони: $a_1 = 290 \text{ m}$, $a_2 = 300 \text{ m}$ и $a_3 = 330 \text{ m}$. Спроводниците од далекуводот се комбинирани Al/C јажиња $240/40 \text{ mm}^2$, за кои се познати основните податоци (видете го примерот 6.1): $A = 282,5 \text{ mm}^2$; $G = 968 \text{ daN/m}$; $d = 21,9 \text{ mm}$; $E = 7700 \text{ daN/mm}^2$; $\alpha = 18,9 \cdot 10^{-6} \text{ 1/}^\circ\text{C}$ и $p = G/A = 3,426 \cdot 10^{-3} \text{ daN/m,mm}^2$. Останатите податоци за координатите на точките на обесување на јажињата се следни: $X_1=0, Y_1=15 \text{ m}$; $X_2=290, Y_2=17,3 \text{ m}$; $X_3=590, Y_3=17,3 \text{ m}$; $X_4=920, Y_4=43 \text{ m}$. Податоците за координатите на точките од теренот А, В, С, Z и D може да се отчитаат и од самата слика П.6/2.



Слика П.6.2.1 Приказ на анализираното затезно поле

Со мерење на висината на спроводниците над тлото во средината од вториот распон, кое што е вршено при $\theta = 40^\circ\text{C}$ е утврдено дека висината на спроводниците над теренот изнесува $\Delta H_2 = 6,85 \text{ m}$. За набљудуваната состојба да се пресмета:

- 1) провесот f_2 во вториот распон;
- 2) параметарот на синцирницата c ;
- 3) хоризонталната компонента на напрегањето на спроводниците во затезното поле $\sigma_x = \sigma$;
- 4) положбите на темињата од синцирницата во одделните распони, т.е. координатите (X_{T1}, Y_{T1}) , (X_{T2}, Y_{T2}) и (X_{T3}, Y_{T3}) на точките T_1 , T_2 и T_3 .
- 5) висината ΔH_Z на спроводниците над тлото во критичната точката „Z“ од третиот распон со координати $X_Z = 850 \text{ m}$ и $Y_Z = 22.5 \text{ m}$.

Решение:

1) Пресметка на провесот во средината од вториот распон

Вториот распон $a_2 = 300 \text{ m}$ е хоризонтален бидејќи точките на обесување „2“ и „3“ се наоѓаат на иста височина, т.е. $\Delta h_2 = Y_3 - Y_2 = 17,3 - 17,3 = 0$. Во тој случај ќе важи:

$$\Delta H_2 + f_2 = Y_2 = Y_3 = 17,3 \text{ m} \Rightarrow f_2 = Y_2 - \Delta H_2 = 17,3 - 6,85 = 10,45 \text{ m}.$$

2) Пресметка на параметарот на синцирницата c

Од познатата релација помеѓу провесот f и параметарот на синцирницата c во даден хоризонтален распон a , се добива:

$$f = a^2 / 8c \Rightarrow c = a^2 / 8f.$$

За вториот распон, значи, ќе имаме:

$$c = a_2^2 / 8f_2 = 300^2 / 8 \cdot 10,45 = 1076,6 \text{ m}.$$

Тука е важно да се напомене дека, како што ќе видиме малку подоцна, параметарот c односно напрегањето σ се исти за сите распони од целото посматрано затезно поле.

3) Пресметка на хоризонталната компонента на напрегањето $\sigma_x = \sigma$

Параметарот на синцирницата c за дадена состојба се дефицира како однос помеѓу напрегањето (се мисли на хоризонталната компонента) σ и спречифичната тежина на јажето од синцирницата p : $c = \sigma / p$, од каде што следува:

$$\sigma = p \cdot c = 3,426 \cdot 10^{-3} \cdot 1076,6 = 3,675 \text{ daN/m,mm}^2.$$

4) Пресметка на координатите на темињата T_1 , T_2 и T_3 од синцирницата

Најнапред ќе ја определеме позицијата на темето T_1 во првиот распон, којшто е кос и за којшто важи:

$$a_1 = 290 \text{ m}; \Delta h_1 = Y_2 - Y_1 = 17,3 - 15,0 = 2,3 \text{ m}.$$

Понатаму, со помош на релацијата (6.34) ќе ја пресметаме вредноста на фиктивниот додаток a_{d1} за овој распон, а потоа и големината на тоталниот распон a_{T1} :

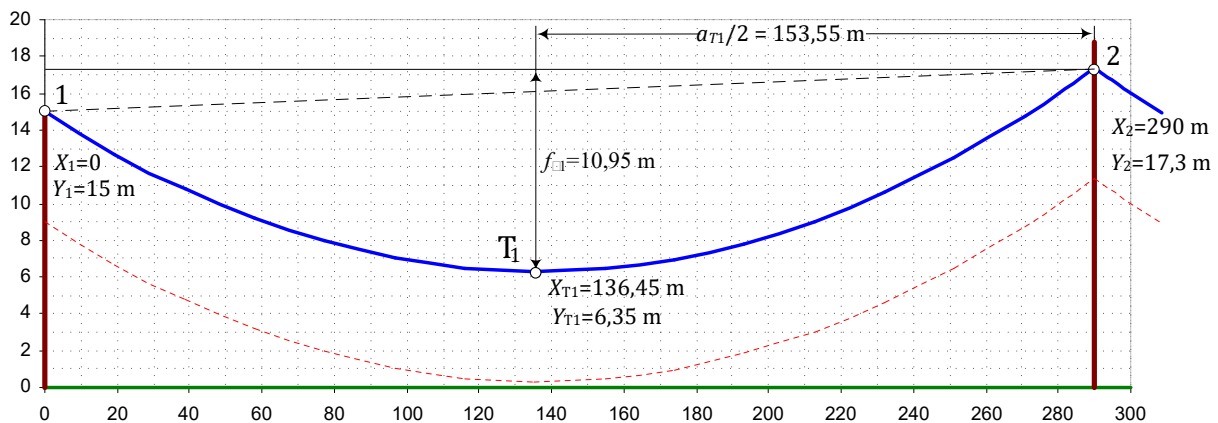
$$a_{d1} = 2c \cdot \frac{\Delta h_1}{a_1} = 2 \cdot 1076,6 \cdot \frac{2,3}{290} = 17,1 \text{ m},$$

$$a_{T1} = a_1 + a_{d1} = 290 + 17,1 = 307,1 \text{ m}; \quad a_{T1}/2 = 153,55 \text{ m}.$$

Провесот на тоталниот распон ќе биде:

$$f_{T1} = a_{T1}^2 / 8c = 307,1^2 / 8 \cdot 1076,6 = 10,95 \text{ m}.$$

На сликата П.6.2.2 е прикажан првиот распон a_1 . Од неа се гледа дека апсцисата X_{T1} од темето на синџирницата во косиот распон се наоѓа на растојание од $a_{T1}/2$ од повисоката точка на обесување „2“ и за неа ќе важи:



Слика П.6.2.2 Приказ на првиот (кос) распон $a_1 = 290 \text{ m}$

$$X_{T1} = X_2 - a_{T1}/2 = 290 - 153,55 = 136,45 \text{ m}.$$

Слично, од сликата П.6.2.2 се гледа дека ординатата од темето на синџирницата во косиот распон е помала од ординатата на горната точка на обесување за провесот на тоталниот распон, од каде што следува:

$$Y_{T1} = Y_2 - f_{T1} = 17,3 - 10,95 = 6,35 \text{ m}.$$

Значи темето T_1 на синџирницата во првиот распон има координати:

$$X_{T1} = 136,45 \text{ m} \text{ и } Y_{T1} = 6,35 \text{ m}.$$

На сличен начин се определуваат и координатите на темињата T_2 и T_3 на синџирницата во вториот односно третиот распон:

$$X_{T2} = 440,00 \text{ m} \text{ и } Y_{T2} = 6,85 \text{ m}.$$

$$X_{T3} = 672,1 \text{ m} \text{ и } Y_{T3} = 14,21 \text{ m}.$$

5) Пресметка на висинската разлика Δh над критичната точка во третиот распон

Синџирницата во било кој распон се опишува со следна општа равенка:

$$y = c \cdot \left(\operatorname{ch} \frac{x}{c} - 1 \right) \approx \frac{x^2}{2c}.$$

Оваа релација ја дава врската помеѓу ординатата y и апсцисата x на било мкоја точка од синцирницата, сметано во однос на темето на самата синцирница, каде што е сместен координатниот почеток. Но кога координатниот почеток е сместен во некоја друга точка од рамнината $X-O-Y$ така што темето од набљудуваната синцирница во новиот координатен систем има координати X_0 и Y_0 тогаш равенката со којашто се опишува провесната крива во набљудуваниот распон ќе го добие следниот облик:

$$Y - Y_0 = c \cdot \left(\operatorname{ch} \frac{X - X_0}{c} - 1 \right) \approx \frac{(X - X_0)^2}{2c}.$$

Врз основа на последната релација, за третиот распон a_3 чиешто теме T_3 има координати X_{T_3} и Y_{T_3} , равенката на провесната крива во тој распон ќе гласи:

$$Y - Y_{T_3} = c \cdot \left[\operatorname{ch} \frac{(X - X_{T_3})}{c} - 1 \right] \approx \frac{(X - X_{T_3})^2}{2c}.$$

Според тоа ординатата Y на точката од синцирницата со апсица $X = 850$ m ќе биде:

$$Y \approx Y_{T_3} + \frac{(X - X_{T_3})^2}{2c} = 14,21 + \frac{(850 - 672,1)^2}{2 \cdot 1076,6} = 28,91 \text{ m}.$$

Од друга страна критичната точка Z има координати $X_Z = 850$ m и $Y_Z = 22,5$ m. Значи висинската разлика на спроводниците над тлото ΔH_Z кај оваа точка ќе биде:

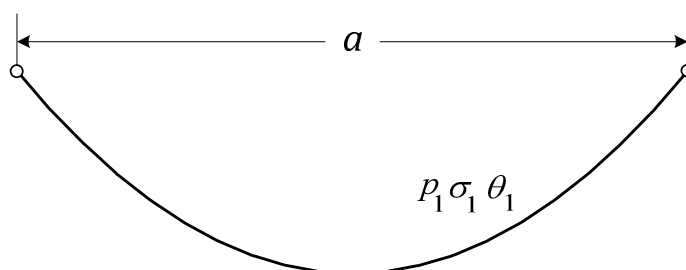
$$\Delta H_Z = Y - Y_Z = 28,91 - 22,5 = 6,41 \text{ m}.$$



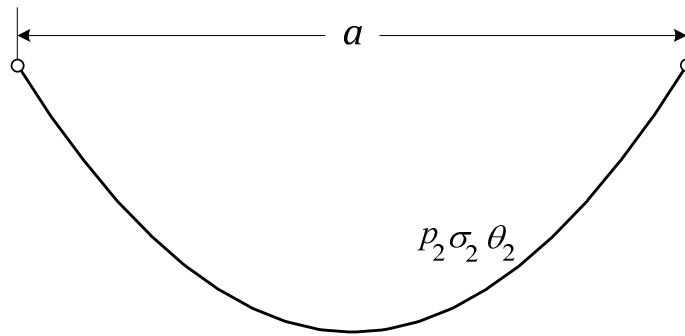
6.2.6 Равенка на состојбата на спроводниците

Досега го анализиравме обликот на синцирницата во распонот како и односите што постојат помеѓу поедините механички величини кај неа, во стационарен режим на работа при константа температура. Да видиме сега какво влијание врз синцирницата и врз останатите величини (напрегање, провес и т.н) ќе има промената на температурата на спроводникот. До промени на температурата на спроводникот најчесто доаѓа поради промена на температурата на амбиентот, но и поради топлината што се ослободува во спроводникот при течење на работната струја низ него.

За да го испитаме влијанието на промената на температурата врз поведението на спроводниците, ќе посматраме еден ист спроводник затегнат во хоризонтален распон a , во две различни состојби (слика 6.11).



а) Состојба 1



б) Состојба 2

Слика 6.11.Облик на синџирницата во хоризонтален распон за две различни состојби на спроводникот.

Во состојбата „1“ спроводникот има температура θ_1 и специфична тежина p_1 , а напрегањето на спроводникот изнесува σ_1 . Со други зборови, состојбата „1“ се карактеризира со следните параметри (p_1, σ_1, θ_1).

Состојбата „2“, пак, се карактеризира со некои други параметри (p_2, σ_2, θ_2), кои во општ случај се разликуваат од параметрите на состојбата „1“.

Со промената на температурата на спроводникот, неговата специфична тежина p не се менува. Параметарот p се менува само под дејство на ветрот или под дејство на зимските додатни товари. Меѓутоа, заради универзалноста на добиените резултати, ќе посматраме најопшт случај во кој е допуштена истовремена промена на сите три параметри.

Должината на синџирницата l_1 во распонот од сликата 6.11.a, (состојба „1“), според релацијата (6.52), ќе изнесува:

$$l_1 = a \cdot \left(1 + \frac{p_1^2 \cdot a^2}{24\sigma_1^2} \right), \quad (6.76.a)$$

додека во состојбата „2“ (слика 6.11 б), спроводникот ќе има некоја друга должина l_2 :

$$l_2 = a \cdot \left(1 + \frac{p_2^2 \cdot a^2}{24\sigma_2^2} \right). \quad (6.76.б)$$

Со одземање на равенката (6.76 а) од равенката (6.76 б), се добива разликата во должината Δl :

$$\Delta l = l_2 - l_1 = \frac{a^3}{24} \cdot \left(\frac{p_2^2}{\sigma_2^2} - \frac{p_1^2}{\sigma_1^2} \right). \quad (6.77)$$

Геометриската разлика Δl , пресметана според (6.77), треба да биде еднаква на физичкото издолжување $\Delta l_{\text{физ}}$ коешто се должи на промената на температурата $\Delta\theta = \theta_2 - \theta_1$ и на промената на напрегањето во спровдникот $\Delta\sigma = \sigma_2 - \sigma_1$.

Доколку дојде само до промена на температурата на спроводникот за износ $\Delta\theta = \theta_2 - \theta_1$, тогаш ќе дојде до промена на должината на спроводникот за износ Δl_θ

$$\Delta l_\theta = \alpha \cdot l_1 \cdot \Delta\theta \approx \alpha \cdot a \cdot \Delta\theta. \quad (6.78)$$

Доколку пак имаме промена само на напрегањето на спроводникот за износ $\Delta\sigma = \sigma_2 - \sigma_1$, ќе дојде до промена на должината на спроводникот за износ Δl_σ :

$$\Delta l_\sigma = l_1 \cdot \frac{\Delta\sigma}{E} \approx a \cdot \frac{\Delta\sigma}{E}. \quad (6.79)$$

Кога во исто време доаѓа до промена како на температурата θ така и на напрегањето σ , новата должина на спроводникот ќе биде:

$$l_2 = l_1 \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta\theta) \cdot \left(1 + \frac{\Delta\sigma}{E}\right). \quad (6.80)$$

Со оглед на фактот дека е $\alpha \cdot \Delta\theta \ll 1$ и $\Delta\sigma/E \ll 1$, последната равенка можеме приближно да ја напишеме на следниот начин:

$$l_2 \approx l_1 \cdot \left(1 + \alpha \cdot \Delta\theta + \frac{\Delta\sigma}{E} + \alpha \cdot \Delta\theta \cdot \frac{\Delta\sigma}{E}\right) \approx l_1 \cdot \left(1 + \alpha \cdot \Delta\theta + \frac{\Delta\sigma}{E}\right), \quad (6.81)$$

или, со оглед дека е $l_1 \approx a$:

$$l_2 \approx l_1 + l_1 \cdot (\alpha \cdot \Delta\theta + \Delta\sigma/E) \approx l_1 + a \cdot (\alpha \cdot \Delta\theta + \Delta\sigma/E), \quad (6.82)$$

од каде што следи:

$$\Delta l = l_2 - l_1 \approx a \cdot [\alpha \cdot (\theta_2 - \theta_1) + (\sigma_2 - \sigma_1)/E] \equiv \Delta l_{\text{физ}}. \quad (6.83)$$

Промената $\Delta l_{\text{физ}}$ добиена со (6.83) мора да биде еднаква на геометриската промена на должината на синцирницата, пресметана според (6.77), од каде се добива:

$$\frac{a^3}{24} \cdot \left(\frac{p_2^2}{\sigma_2^2} - \frac{p_1^2}{\sigma_1^2}\right) = a \cdot \left[\alpha \cdot (\theta_2 - \theta_1) + \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{E}\right]. \quad (6.84)$$

т.е.

$$\frac{p_2^2 \cdot a^2}{24\sigma_2^2} - \frac{p_1^2 \cdot a^2}{24\sigma_1^2} = \alpha \cdot (\theta_2 - \theta_1) + \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{E}. \quad (6.85)$$

Последната релација, која ја дава врската помеѓу параметрите на двете различни состојби $(p_1, \sigma_1, \theta_1)$ и $(p_2, \sigma_2, \theta_2)$, се нарекува *равенка на промена на состојбата, или скратено равенка на состојбата*.

Кога се познати параметрите на една од состојбите, а сакаме да ги определиме параметрите на другата – новата состојба, равенката на состојбата (6.85) често пати ја применуваме и во нешто поинаква форма¹:

$$\frac{p^2 \cdot a^2}{24\sigma^2} - \frac{p_0^2 \cdot a^2}{24\sigma_0^2} = \alpha \cdot (\theta - \theta_0) - \frac{\sigma - \sigma_0}{E^*} \quad (6.86)$$

Во (6.86), со p_0, σ_0, θ_0 се означени параметрите на познатата состојба, додека со p, σ, θ се означени параметрите на непознатата состојба.

¹ Кај косите распони во равенката на состојбата (7.85) односно (7.86), според [3], место модулот на еластичност E , треба да фигурира величината $E^* = E \cdot \cos \psi$.

Обично, во новата состојба се познати температурата θ и специфичната тежина на спроводникот p , а непознато е единствено напрегањето σ . Во тој случај, равенката на состојбата (6.86) може да се напише во следниов облик:

$$\sigma + m = \frac{n^2}{\sigma^2}, \quad (6.87)$$

каде што е:

$$m = \frac{p_0^2 \cdot a^2}{24\sigma_0^2} \cdot E + \alpha \cdot E \cdot (\theta - \theta_0) - \sigma_0 \quad \text{и} \quad n = p \cdot a \cdot \sqrt{\frac{E}{24}}. \quad (6.88)$$

Од (6.87) заклучуваме дека во последниот случај, пресметувањето на непознатото напрегање σ се сведува на решавање на една кубна равенка (полином од трет степен):

$$\sigma^3 + m \cdot \sigma^2 - n^2 = 0. \quad (6.89)$$

6.2.7 Решавање на равенката на состојбата

Равенката (6.87) односно (6.89) во општ случај има три решенија (корени) од кои едното е секогаш реално и позитивно, а останатите две се реални и негативни или пак се коњугирано комплексни. За нас е од интерес единствено реалното позитивно решение.

Решавањето на равенката (6.87) во принцип може да се изведе на два различни начина: класично, преку радикали (со помош на т.н. „карданови формули“), или пак нумерички, со некоја итеративна постапка. Класичниот начин на решавање е премногу сложен за практична примена, па затоа, тој ретко се користи. Овде ќе бидат разгледувани два поедноставни и значително поефикасни начина за решавање на наведениот проблем. Првиот начин користи готови, претходно формирани, табели на решенијата на равенката на состојбата (6.87), и него ќе го наречеме „табличен начин“ на решавање. Вториот начин е познатиот Њутонов метод за итеративно решавање на алгебарските равенки.

Доколку не располагаме со компјутер или рачен калкулатор, решението на равенката (6.87) можеме да го добиеме по табличен пат. Кај табличниот начин на решавање, се користи готова табела во која се прикажани решенијата на равенката на состојбата (6.87). Решението σ на равенката (6.87) ќе зависи од вредноста на параметрите m и n . Параметарот m може да има произволна вредност во интервалот $(-\infty, \infty)$, додека параметарот n секогаш ќе има позитивна вредност во интервалот $(0, \infty)$. Во табелата 6.2 се прикажани решенијата на равенката на состојбата (6.87) (заокружени на втората децимала), за разни вредности на параметарот m во интервалот $(-20, 50)$ и разни вредности на параметарот n , во интервалот $(1, 60)$. За вредностите на m и n што се надвор од споменатите интервали, ќе треба да се користат други начини на решавање на равенката (6.87) или да се изврши проценка на решението σ со помош на следните релации:

$$\begin{array}{llll} \text{кога } m \rightarrow \infty & \text{кога } |m| \rightarrow 0 & \text{кога } m \rightarrow -\infty & \text{кога } n \rightarrow \infty \\ \sigma \rightarrow \frac{n}{\sqrt{m+n}/\sqrt{m}} & \sigma \rightarrow n^{2/3} - \frac{m}{3} & \sigma \rightarrow -m & \sigma \rightarrow n^{2/3} \end{array} \quad (6.90)$$

Табелата 6.3 ги дава напрегањата σ за дискретни вредности на параметрите m и n . За вредностите на m и n што не се наоѓаат во табелата 6.3, решението σ ќе се добие, на пример, со примена на постапката за линеарна интерполација. Линеарната интерполација, во принцип, ќе внесе некаква грешка, но таа е овде занемарливо мала.

Табличниот начин на решавање на равенката на состојбата и примената на постапката на линеарна интерполација ќе бидат илустрирани на следните два примера.

Пример 6.3. Да се определи решението на равенката $\sigma + 4 = 16/\sigma^2$.

Во овој случај ќе имаме: $m = 4$; $n = \sqrt{16} = 4$, па од табелата 6.3 за наведените вредности на m и n ја отчитуваме вредноста на решението, заокружена на втората децимала: $\sigma = 1,68$.

Точната вредност на решението од поставениот проблем инаку изнесува $\sigma_T = 1,67857351$, што значи дека отчитаната вредност за решението σ , поради заокружувањето, се разликува од својата точна вредност σ_T за помалку од 0,1%, што е за практични цели сосема прифатливо.



Пример 6.4. Да се определи решението на равенката $\sigma + 4,3 = (6,5/\sigma)^2$.

Бидејќи во овој случај вредностите на коефициентите m и n не се цели броеви, за определување на решението σ со помош на табелата 6.3 ќе ја примениме постапката на линеарна интерполација. За таа цел, од интерес ќе биде само делот од табелата 6.3 што се однесува на редиците за $m = 4$ и $m = 5$ и колоните за $n = 6$ и $n = 7$.

	....	$n = 5$	$n = 6$	$n = 7$
....
$m = 3$	....	....	....	....
$m = 4$	....	....	2,38	2,70
$m = 5$	....	....	2,23	2,55

За определување на решението $\sigma(m, n)$ ќе се користиме со следната релација:

$$\sigma(m, n) \approx \sigma(m_0, n_0) + \frac{\partial \sigma}{\partial m} \cdot (m - m_0) + \frac{\partial \sigma}{\partial n} \cdot (n - n_0).$$

Во конкретниот случај ќе имаме:

$$m = 4,3; \quad m_0 = 4; \quad m - m_0 = 0,3;$$

$$n = 6,5; \quad n_0 = 6; \quad n - n_0 = 0,5.$$

додека од табелата 6.3 (или поточно, од горе прикажаниот нејзин дел), отчитуваме:

$$\sigma(m_0, n_0) = 2,38; \quad \frac{\partial \sigma}{\partial m} \approx \frac{2,23 - 2,38}{5 - 4} = -0,15; \quad \frac{\partial \sigma}{\partial n} \approx \frac{2,70 - 2,38}{7 - 6} = 0,32$$

Според тоа, решението на поставената задача приближно ќе биде:

$$\sigma = 2,38 - 0,15 \cdot 0,3 + 0,32 \cdot 0,5 = 2,495 ,$$

и тоа се разликува од својата точна вредност $\sigma_T = 2,493778$ за само 0,05%.



Кога не располагаме со споменатата табела или пак кога некој од параметрите m или n не е опфатен со неа, решението на равенката на состојбата (6.87) ќе можеме да го добиеме нумерички, со некоја итеративна постапка. Како сосема погодна за таа цел се покажала постапката која базира на примената на њутоновиот итеративен метод [4].

Ако ја воведеме функцијата:

$$f(\sigma) = \sigma + m - \frac{n^2}{\sigma^2}, \quad (6.91)$$

ќе имаме:

$$f'(\sigma) = 1 + \frac{2n^2}{\sigma^3}. \quad (6.92)$$

Според њутоновиот метод, вредноста на непознатата σ_{k+1} во $k+1$ -тата итерација ќе ја добиеме ако ни е позната вредноста на непознатата σ_k во k -тата итерација, со помош на релацијата (6.93):

$$\sigma_{k+1} = \sigma_k - \frac{f(\sigma_k)}{f'(\sigma_k)}; \quad k = 0, 1, 2, \dots \quad (6.93)$$

односно:

$$\sigma_{k+1} = \sigma_k - \frac{\sigma_k + m - n^2 / \sigma_k^2}{1 + 2n^2 / \sigma_k^3}; \quad k = 0, 1, 2, \dots \quad (6.94)$$

Секоја итеративна постапка што се применува за решавање на равенката на состојбата ќе бара познавање на едно почетно решение $\sigma_0 = \sigma_p$ кое мора да биде доволно блиску до вистинското решение σ_T , за итеративниот процес на решавање сигурно да конвергира, а бараното решение (при однапред зададена точност) да се добие со што е можно помал број итерации.

Изборот на почетното решение σ_p е наједноставен кога ја користиме табелата 6.3 (со или без примена на постапката за линеарна интерполација). Друг начин за добивање на добро почетно решение σ_p е даден со релациите (6.95 а)... (6.95 д).

I случај, кога е $m > 0$:

$$\sigma_p = \sigma_D + 0,3 \cdot (\sigma_G - \sigma_D) , \quad (6.95 \text{ а})$$

каде што е:

$$\sigma_G = \frac{n}{\sqrt{m}}; \quad \sigma_D = \frac{\sigma_G}{1 + \sigma_G / 2m} \quad (6.95 \text{ б})$$

при што σ_D и σ_G се долна и горна граница од интервалот во кој со сигурност се наоѓа точното решение σ_T , т.е. $\sigma_D \leq \sigma_T \leq \sigma_G$.

II случај, кога е $m < 0$:

$$\sigma_p = n^{2/3} + \frac{|m|}{3}, \quad \text{кога е } n^{2/3} > |m|; \quad (6.95 \text{ v})$$

$$\sigma_p = |m| + \frac{n^{2/3}}{3}, \quad \text{кога е } n^{2/3} \leq |m|; \quad (6.95 \text{ г})$$

III случај, кога $|m| \rightarrow 0$:

$$\sigma_p = n^{2/3} - \frac{m}{3}. \quad (6.95 \text{ d})$$

Релациите (6.95 а)... (6.95 г) обезбедуваат во сите случаи добро почетно решение σ_p , така што конвергенцијата на итеративниот процес е секогаш загарантирана, а потребниот број на итерации со кои ќе се добие решение со доволно висока точност, е релативно мал. Многу поточни проценки на почетното решение σ_p (но затоа и посложени изрази за неговото пресметување) се изнесени во [4]. Со нив се добива решение со многу висока точност (грешка помала од 0,001%) за најмногу три итерации, според алгоритмот (6.94).

За решавање на равенката на состојбата, како практична се покажала и следната итеративна (рекурентна) постапка:

$$\sigma_{k+1} = \frac{n}{\sqrt{m + \sigma_k}}; \quad k = 0, 1, 2, \dots \quad (6.96)$$

Постапката (6.96) е во случајот $m > 0$ секогаш конвергентна. Во случаите кога е $m < 0$, конвергенцијата е поспора, па дури може да се случи процесот воопшто и да не конвергира, независно од точноста со која е определено почетното решение σ_p . Затоа, кога е $m < 0$, препорачливо е да се користи постапката (6.94) која базира на примената на њутоновиот итеративен метод, затоа што е тој, и покрај својата сложеност, секогаш конвергентен. Во случаите кога е $m > 0$, заради својата едноставност, поефикасно е да се применува рекурентната релација (6.96).

Во прилогот П.1 е даден листинг на програмата за сметачка машина, наменета за пресметување на равенката на состојбата (6.87) напишана во Basic.

Пример 6.5. Да се определи точното решение на равенката $\sigma + 4 = 16/\sigma^2$.

Во случајов ќе имаме $m = 4$; $n = 4$, па за неговото решавање ќе ја примениме рекурентната постапка (6.96). Почетното решение σ_p ќе го добиеме според релацијата (6.95.а):

$$\sigma_G = \frac{n}{\sqrt{m}} = \frac{4}{\sqrt{4}} = 2; \quad \sigma_D = \frac{\sigma_G}{1 + \sigma_G / 2m} = \frac{2}{1 + 2/8} = 1,6.$$

па според тоа, ќе добиеме:

$$\sigma_p = \sigma_D + 0,3 \cdot (\sigma_G - \sigma_D) = 1,720.$$

Понатаму следи итеративниот процес според алгоритмот даден со (6.96):

$$\begin{aligned}\sigma_0 &= \sigma_P = 1,720; \\ \sigma_1 &= \frac{n}{\sqrt{m + \sigma_0}} = \frac{4}{\sqrt{4 + 1,720}} = 1,672; \\ \sigma_2 &= \frac{n}{\sqrt{m + \sigma_1}} = \frac{4}{\sqrt{4 + 1,672}} = 1,680; \\ \sigma_3 &= \frac{n}{\sqrt{m + \sigma_2}} = \frac{4}{\sqrt{4 + 1,680}} = 1,678;\end{aligned}$$

итн.

Очигледно е дека итеративниот процес на решавање може да се прекине веќе после третата итерација, и за решение на проблемот да се прогласи последната вредност, т.е: $\sigma = \sigma_3 = 1,678$.



Пример 6.6. Да се определи решението на равенката $\sigma - 4 = 16/\sigma^2$.

Во овој случај имаме: $m = -4$; $n = 4$; $n^{2/3} = 2,52 < |m|$, па поради тоа, почетното решение ќе го добиеме со помош на (6.95 в):

$$\sigma_0 = \sigma_P = |m| + \frac{n^{2/3}}{3} = 4 + \frac{2,52}{3} = 4,84.$$

Бидејќи е $m < 0$, ќе го користиме њутоновиот итеративен метод, според (6.94). Во првата итерација ($k = 0$) ќе имаме:

$$f(\sigma_0) = \sigma_0 + m - \frac{n^2}{\sigma_0^2} = 0,157; \quad f'(\sigma_0) = 1 + \frac{2n^2}{\sigma_0^3} = 1 + \frac{2 \cdot 4^2}{4,84^3} = 1,282.$$

Понатаму, решението σ_1 од првата итерација според (6.94) ќе биде:

$$\sigma_1 = \sigma_0 - \frac{f(\sigma_0)}{f'(\sigma_0)} = 4,84 - \frac{0,157}{1,282} = 4,71756.$$

На сличен начин се постапува и понатаму, за секоја наредна итерација. Како резултат на итеративниот процес се добива следната низа решенија:

$$\begin{aligned}\sigma_0 &= 4,84; \\ \sigma_1 &= 4,71756; \\ \sigma_2 &= 4,71861; \\ \sigma_3 &= 4,71861; \\ &-----\end{aligned}$$

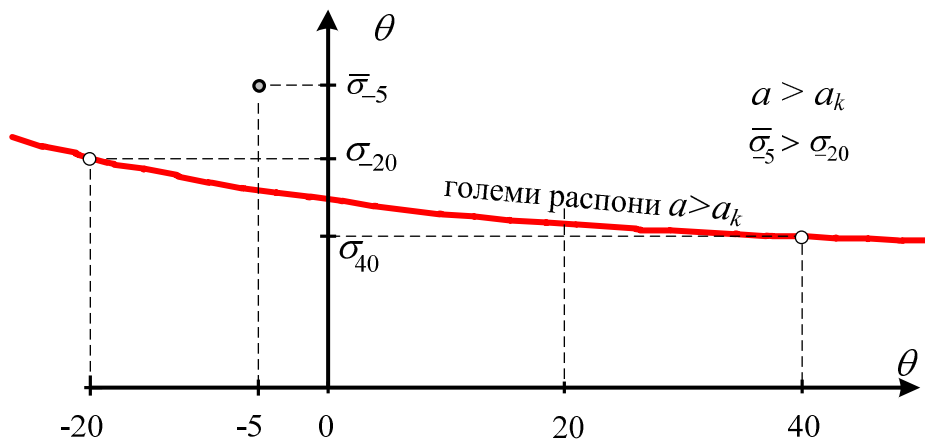
што значи дека за решение на задачата може да се прогласи вредноста $\sigma_3 = 4,71861$.



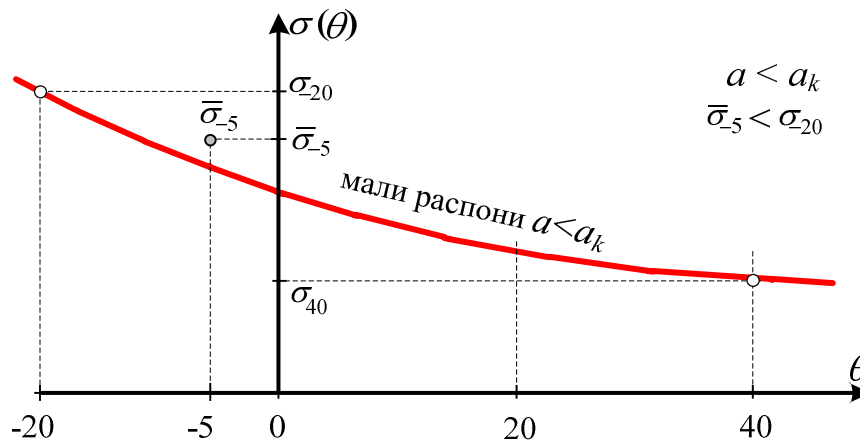
6.2.8 Критичен распон

Со повеќекратна примена на равенката на состојбата во температурниот интервал ($\theta_{\min} - \theta_{\max}$), ги добиваме зависностите $\sigma(\theta)$ и $f(\theta)$. Притоа, зависноста $\sigma(\theta)$ претставува монотонно опаѓачка функција, додека пак зависноста $f(\theta)$ претставува монотонно растечка функција која има облик, близок до права линија.

Со $\bar{\sigma}_{-5}$ ќе го означиме напрегањето во состојбата при -5°C со нормален зимски додатен товар (НЗДТ), додека со σ_{-20} ќе го означиме напрегањето на спроводникот при минималната температура -20°C (без ЗДТ). Тогаш, зависно од големината на распонот a , ќе се јави еден од двата можни случаи, прикажани на сликите 6.11а и 6.11б.



а) облик на кривата $\sigma(\theta)$ кај големите распони за кои е $a > a_k$



б) облик на кривата $\sigma(\theta)$ кај малите распони за кои е $a < a_k$

Слика 6.12 Зависност на напрегањето σ во спроводниците и јажињата од темературата θ

Обликот на зависноста $\sigma(\theta)$, прикажан на сликата 6.12.а, е типичен за големите распони. Кај нив, напрегањето σ споро опаѓа со порастот на температурата θ и разликата ($\sigma_{-20} - \sigma_{40}$) за двете крајни температури е релативно мала. Освен тоа, кај големите распони напрегањето $\bar{\sigma}_{-5}$ е поголемо од напрегањето σ_{-20} што се јавува при минималната температура.

Од друга страна, кај малите распони имаме обратна ситуација, т.е. кривата $\sigma(\theta)$ е доста стрмна и разликата ($\sigma_{-20} - \sigma_{40}$) е прилично голема, додека напрегањето $\bar{\sigma}_{-5}$ е помало од напрегањето σ_{-20} .

Постои некој распон за кој што ќе биде $\bar{\sigma}_{-5} = \sigma_{20}$. Тој распон за кој што напрегањата $\bar{\sigma}_{-5}$ и σ_{-20} се меѓусебно еднакви, се нарекува *критичен распон* a_k . За критичниот распон важи:

$$\bar{\sigma}_{-5} = \sigma_{-20} = \sigma_M. \quad (6.97)$$

Во равенката (6.97) со σ_M е означено т.н. „максимално работно напрегање“ на спроводникот/јажето. Како што беше кажано во точката 2.3.7, тоа претставува однапред избрана сметковна вредност на хоризонталната компонента на напрегањето σ_x што во нормални услови ќе се постигне во критичниот случај.

Ќе ја примениме равенката на состојбата (6.85) за споменатите две состојби (состојбата при -20°C без зимски додатен товар ќе биде состојба „1“, додека состојбата при $-5^\circ\text{C} + \text{НЗДТ}$ ќе биде состојбата „2“). Тогаш врз основа на кажаното ќе можеме да пишуваме:

– состојбата „1“ ќе има параметри:

$$p_1 = p; \quad \sigma_1 = \sigma_M; \quad \theta_1 = -20^\circ\text{C},$$

– состојбата „2“ ќе има параметри:

$$p_2 = \bar{p} = p + \Delta p_n = p + k_n \cdot (g/A); \quad \sigma_2 = \sigma_M; \quad \theta_2 = -5^\circ\text{C}.$$

$$\frac{\bar{p}^2 \cdot a_k^2}{24 \cdot \sigma_M^2} - \frac{p^2 \cdot a_k^2}{24 \cdot \sigma_M^2} = \alpha \cdot (-20 + 5) + \frac{(\sigma_M - \sigma_M)}{E}, \quad (6.98)$$

од каде, после средувањето, се добива големината на критичниот распон:

$$a_k = \sigma_M \cdot \sqrt{\frac{360 \cdot \alpha}{\bar{p}^2 - p^2}} \quad (6.99)$$

Според тоа, ако распонот a е поголем од критичниот распон a_k , тогаш однапред ќе знаеме дека максималното напрегање во спроводниците (јажињата) ќе се јави при $-5^\circ\text{C} + \text{НЗДТ}$, додека во случајот кога е $a < a_k$, максималното напрегање се јавува при минималната температура $\theta = \theta_{\min} = -20^\circ\text{C}$.

Пример 6.7. За спроводниците од примерот 6.1 (комбинирани Al/Ѓ јажиња $240/40 \text{ mm}^2$) да се пресмета вредноста на критичниот распон за разни вредности на факторот на нормален зимски додатен товар k_n во интервалот од 1 до 4. За ова јаже се познати следните податоци: $A = 282,5 \text{ mm}^2$; $G = 0,968 \text{ daN/m}$; $d = 21,9 \text{ mm}$; $E = 7700 \text{ daN/mm}^2$; $\alpha = 18,9 \cdot 10^{-6} \text{ } 1/^\circ\text{C}$; $p = G/A = 3,426 \cdot 10^{-3} \text{ daN/m, mm}^2$. За максималното работно напрегање е усвоена вредноста $\sigma_M = 9 \text{ daN/mm}^2$.

Решение:

Задачата ќе ја решиме најнапред за случајот кога е $k_n = 1$. Во тој случај основниот зимски додатен товар ќе биде:

$$g = 0,18 \cdot \sqrt{d} = 0,18 \cdot \sqrt{21,9} = 0,842 \text{ daN/m}$$

додека нормалниот зимски додатен товар од мраз по единица должина ќе биде:

$$\Delta G = k_n \cdot g = 1,0 \cdot 0,842 = 0,842 \text{ daN/m.}$$

Специфичната тежина на нормалниот зимски додатен товар од мраз ќе изнесува:

$$\Delta p = \Delta p_n = \Delta G / A = 0,842 / 282,5 = 2,982 \cdot 10^{-3} \text{ daN/m,mm}^2.$$

Сопствената спресицивјќна тежина на спроводникот изнесува:

$$p_s = p = G / A = 0,968 / 282,5 = 3,4265 \cdot 10^{-3} \text{ daN/m,mm}^2$$

додека специфичната тежина на замрзнатиот спроводник со НЗДТ ќе биде:

$$\bar{p} = p + \Delta p_n = (3,426 + 2,982) \cdot 10^{-3} = 6,408 \cdot 10^{-3} \text{ daN/m,mm}^2.$$

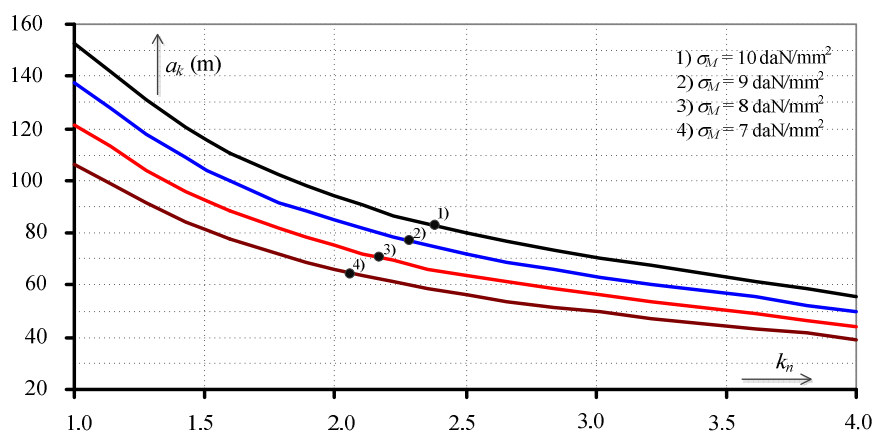
Според (6.99) за критичниот распон во овој случај добиваме:

$$a_k = \sigma_M \cdot \sqrt{\frac{360 \cdot \alpha}{\bar{p}^2 - p^2}} = 9 \cdot \sqrt{\frac{360 \cdot 18,9 \cdot 10^{-6}}{(6,408^2 - 3,426^2) \cdot 10^{-6}}} = 137,9 \text{ m.}$$

На сосема ист начин ги добиваме вредностите на критичниот распон и за другите комбинации од вредностите за максималното работно напрегање σ_M и факторот на нормален зимски додатен товар k_n . Резултатите од овие пресмеки се прикажани во табелата П.6.7.1 и на сликата П.6.7.1.

Табела П.6.7.1 Табеларен приказ на зависноста $a_k = f(\sigma_M, k_n)$ за јаже Al/Č 240/40

σ_M (daN/mm ²)	7	8	9	10
$k_n = 1,0$	106,6	121,7	137,9	152,3
$k_n = 1,6$	77,5	88,6	99,7	110,9
$k_n = 2,5$	55,9	63,9	71,9	79,9
$k_n = 4,0$	38,6	44,1	49,6	55,1



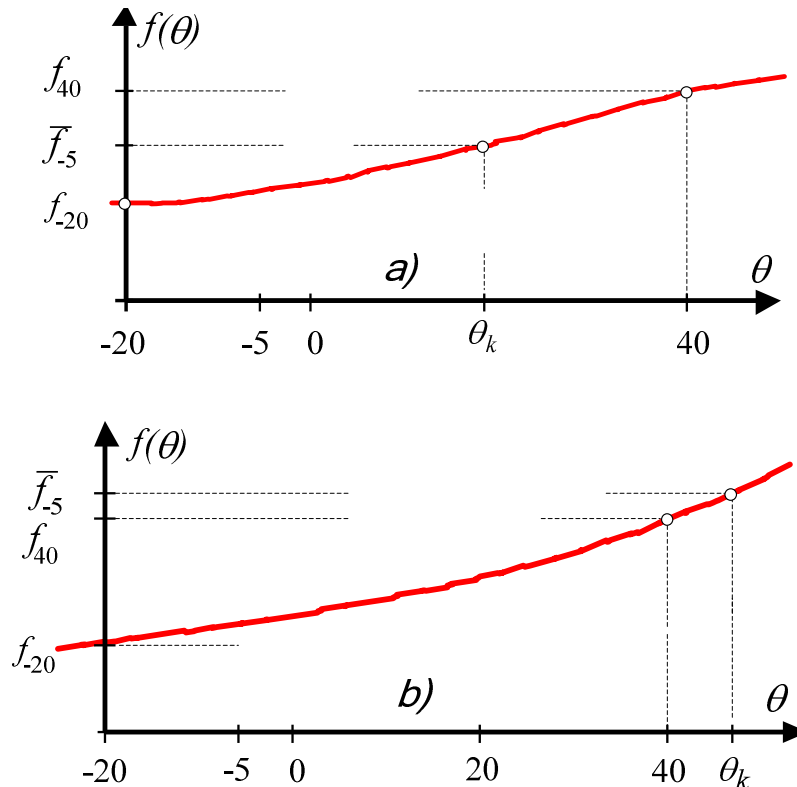
Слика П.6.7.1 Зависност на големината на критичниот распон од параметрите σ_M и k_n



6.2.9 Критична температура

Ако за механичкото димензионирање на надземните водови беше важно да се знае кога се јавува максималното работно наптегање, за изборот на висдините на столбовите е важно да се знае колкави се најголемите провеси на на спроводниците и кога се јавуваат тие.

Ако ја посматраме зависноста $f(\theta)$ во температурниот опсег $(\theta_{\min} - \theta_{\max})$ и ако со \bar{f}_{-5} го означиме провесот при $-5^\circ\text{C} + \text{НЗДТ}$, тогаш зависно од механичките карактеристики на посматраниот спроводник, можат да настанат два случаја, прикажани на сл. 6.13 а и 6.13 б.



Слика 6.13 Зависност на големината на провесот на спроводниците во зависност од нивната температура: а) $\theta_k < 40^\circ\text{C}$; б) $\theta_k > 40^\circ\text{C}$

Критична температура θ_k е онаа температура, при која провесот f_{θ_k} е еднаков на провесот \bar{f}_{-5} што се има при $-5^\circ\text{C} + \text{НЗДТ}$. Според тоа, ако критичната температура θ_k е помала од $+40^\circ\text{C}$, тогаш тоа ќе значи дека провесот на спроводниците е максимален при максималната температура, т.е. состојбата при $+40^\circ\text{C}$ ќе биде меродавна за изборот на височините на столбовите – и обратно, односно:

$$\begin{aligned} \theta_k < 40^\circ\text{C} &\Rightarrow f_{40} > \bar{f}_{-5} \text{ т.е. } f_{\max} = f_{40}, \\ \theta_k > 40^\circ\text{C} &\Rightarrow f_{40} < \bar{f}_{-5} \text{ т.е. } f_{\max} = \bar{f}_{-5}. \end{aligned} \quad (6.99)$$

Критичната температура ќе ја пресметаме со помош на равенката на состојбата. За таа цел ќе ги посматраме провесите односно должините на спроводникот во распонот, во состојбата при $\theta = \theta_k$ која ќе ја означиме како состојба „2“ и за состојбата при $-5^\circ\text{C} + \text{НЗДТ}$ (состојба „1“):

$$\frac{p^2 \cdot a^2}{24 \cdot \sigma_{\theta k}^2} - \frac{\bar{p}^2 \cdot a^2}{24 \cdot \bar{\sigma}_{-5}^2} = \alpha \cdot [\theta_k - (-5)] + \frac{\sigma_{\theta k} - \bar{\sigma}_{-5}}{E}. \quad (6.100)$$

Имајќи предвид дека е $f_{\theta k} = \bar{f}_{-5}$, врз основа на (6.39) добиваме:

$$\frac{p \cdot a^2}{8 \cdot \sigma_{\theta k}} = \frac{\bar{p} \cdot a^2}{8 \cdot \bar{\sigma}_{-5}}, \quad (6.101)$$

од каде следи релацијата:

$$\sigma_{\theta k} = \bar{\sigma}_{-5} \cdot \frac{p}{\bar{p}}, \quad (6.102 \text{ a})$$

односно:

$$\frac{p}{\sigma_{\theta k}} = \frac{\bar{p}}{\bar{\sigma}_{-5}} \quad (6.102 \text{ b})$$

Понатаму, множејќи ја левата страна од равенката (6.101) со односот $p/\sigma_{\theta k}$, а десната страна со односот $\bar{p}/\bar{\sigma}_{-5}$, ја добиваме релацијата:

$$\frac{p^2 \cdot a^2}{8 \sigma_{\theta k}^2} - \frac{\bar{p}^2 \cdot a^2}{8 \bar{\sigma}_{-5}^2} = 0. \quad (6.103).$$

Според тоа, имајќи ја предвид последната релација и релацијата (6.100), добиваме:

$$0 = \alpha \cdot (\theta_k + 5) + \frac{\sigma_{\theta k} - \bar{\sigma}_{-5}}{E}, \quad (6.104 \text{ a})$$

т.е. со оглед на (6.102 a):

$$0 = \alpha \cdot (\theta_k + 5) - \frac{\bar{\sigma}_{-5}}{E} \cdot \left(1 - \frac{p}{\bar{p}}\right), \quad (6.104 \text{ b})$$

и конечно:

$$\boxed{\theta_k = \frac{\bar{\sigma}_{-5}}{E \cdot \alpha} \cdot \left(1 - \frac{p}{\bar{p}}\right) - 5.} \quad (6.105)$$

6.2.10 Граничен распон

Досегашните механички пресметки на спроводниците се однесуваа на таканаречените нормални погонски состојби при кои се јавуваат нормални напрегања. Меѓутоа нашите прописи захтеваат спроводниците и јажињата да имаат определен степен на механичка сигурност и во случаите кога кај нив се јавуваат и исклучителни напрегања под дејство на исклучителните зимски додатни товари (ИЗДТ). Имено, според прописите, напрегањето во точките на зацврстување не смеат да ја надминат вредноста на исклучителното дозволено напрегање σ_{id} (дефинирано со табелата 2.6 од точката 2.3.7), при исклучителен зимски додатен товар на температура од -5°C .

За да не вршиме контрола на напрегањата во точките на зацврстување на спроводниците и јажињата во секој распон од надземниот вод, се служиме со таканаречениот *граничен распон*. Граничен распон е оној хоризонтален распон за кој, напрегањето во спроводникот во точките на зацврстување при $-5^{\circ}\text{C} + \text{ИЗДТ}$ ќе биде еднакво на исклучително дозволеното напрегање σ_{id} .

Од самата дефиниција на граничниот распон произлегува дека со помош на него можат да се контролираат само хоризонталните распони. За да можеме да ги контролираме напрегањата во точките на зацврстување на спроводниците и јажињата и кај косите распони, косиот распон ќе треба да го дополниме до тоталниот распон, на начинот што е изложен во точката 6.2.2. Според тоа, ако тоталниот распон a_T (а не вистинскиот распон a) на спроводникот/јажето е помал од граничниот распон a_{gr} , тогаш напрегањата во точките на зацврстување при $-5^{\circ}\text{C} + \text{ИЗДТ}$ ќе бидат помали од дозволеното напрегање σ_{id} , и обратно. На тој начин, значи, може да се врши контрола на напрегањата на затегање во спроводниците и јажињата при појава на ИЗДТ без да се врши нивно директно пресметување со помош на изразите (6.66) и (6.67) односно (6.73) и (6.74). Овој начин на контрола на напрегањата во спроводниците и јажињата е особено практичен при проектирањето на надземните водови бидејќи тоталните распони можат лесно да се определуваат висуелно, на самиот надолжен профил на трасата, по графички пат, со помош на таканаречен „шаблон“ (види „Упатство за решавање ...“).

Ако со σ_x ја означиме вредноста на хоризонталната компонента на напрегањето во спроводникот во граничниот распон a_{gr} при $-5^{\circ}\text{C} + \text{ИЗДТ}$, тогаш, земајќи ја состојбата при $-5^{\circ}\text{C} + \text{ИЗДТ}$ за втора состојба „2“ и состојбата при $-5^{\circ}\text{C} + \text{ИЗДТ}$ за прва состојба „1“, од равенката на состојбата (6.85) произлегува следната релација:

$$\text{состојба „1“, со параметри: } p_1 = \bar{p} = p + \Delta p_n = p + k_n \cdot (g/A); \quad \sigma_1 = \sigma_M; \quad \theta_1 = -5^{\circ}\text{C},$$

$$\text{состојба „2“, со параметри: } p_2 = \bar{\bar{p}} = p + \Delta p_i = p + k_i \cdot \Delta p_n; \quad \sigma_2 = \sigma_x; \quad \theta_2 = -5^{\circ}\text{C}.$$

$$\frac{\bar{\bar{p}}^2 \cdot a_{gr}^2}{24 \cdot \sigma_x^2} - \frac{\bar{p}^2 \cdot a_{gr}^2}{24 \cdot \sigma_M^2} = \alpha \cdot (-5 + 5) + \frac{(\sigma_x - \sigma_M)}{E}, \quad (6.106)$$

Во последната релација непознати величини се напрегањето σ_x и граничниот распон a_{gr} .

Истовремено со релацијата (6.106), за вкупното (резултантното) напрегање во точката на обесувањето σ' ќе важи:

$$\sigma' = \sigma_{id} = \sigma_x + \frac{\bar{\bar{p}}^2 \cdot a_{gr}^2}{8 \sigma_x}, \quad (6.107)$$

од каде што се добива:

$$a_{gr}^2 = \frac{8 \sigma_x}{\bar{\bar{p}}^2} \cdot (\sigma_{id} - \sigma_x). \quad (6.108)$$

Релациите (6.106) и (6.108) претставуваат систем од две равенки со две непознати. Непознатото напрегање σ_x најлесно ќе го пресметаме ако вредноста a_{gr}^2 што фигурира во релацијата (6.106) се замени со изразот на десната страна од (6.108). На тој начин се добива нова релација во која како единствена непозната ќе фигурира величината σ_x . По средувањето, оваа релација ќе го добие следниот облик:

$$\frac{\bar{p}^2 \cdot E}{3 \bar{p}^2 \cdot \sigma_M^2} \cdot \sigma_x^4 + \left(1 - \frac{\bar{p}^2 \cdot E \cdot \sigma_{id}}{3 \bar{p}^2 \cdot \sigma_M^2} \right) \cdot \sigma_x^3 + \left(\sigma_M - \frac{E}{3} \right) \cdot \sigma_x^2 + \frac{E \cdot \sigma_{id}}{3} \cdot \sigma_x = 0. \quad (6.109)$$

Според тоа, непознатата σ_x може да се добие со решавање на една алгебарска равенка од IV ред.

По пресметувањето на напрегањето σ_x следи определувањето на граничниот распон a_{gr} . Бидејќи за граничниот распон, исто така, важи и релацијата:

$$\sigma_{id} = \sigma_x \cdot \operatorname{ch} \left(\frac{\bar{p} \cdot a_{gr}}{2 \sigma_x} \right), \quad (6.110)$$

тогаш со претходно пресметаната вредност на напрегањето σ_x лесно ќе ја определеме вредноста на граничниот распон:

$$a_{gr} = 2 \cdot \frac{\sigma_x}{\bar{p}} \cdot \operatorname{Ar ch} \frac{\sigma_{id}}{\sigma_x} = 2 \cdot \frac{\sigma_x}{\bar{p}} \cdot \ln \left(\frac{\sigma_{id}}{\sigma_x} + \sqrt{\frac{\sigma_{id}^2}{\sigma_x^2} - 1} \right). \quad (6.111)$$

Вредноста на граничниот распон можеме да ја добиеме и на друг начин – со итеративна постапка. Во тој случај, при определувањето на почетното решение на хоризонталната компонента на напрегањето во спроводникот σ_x при $-5^\circ\text{C} + \text{ИЗДТ}$, ќе ја искористиме особената на јажињата кај далекуводите, кога се работи за големи распони (каков што е граничниот распон), тие сосема малку да се издолжуваат под дејство на зголемениот зимски додатен товар. Со други зборови, ќе претпоставиме дека обликот на синџирницата на спроводникот при $-5^\circ\text{C} + \text{ИЗДТ}$ и нејзиниот облик при $-5^\circ\text{C} + \text{ИЗДТ}$ се практично исти, па според тоа и параметрите на синџирниците на спроводникот \bar{c} и \bar{c} за состојбите при $-5^\circ\text{C} + \text{ИЗДТ}$ и $-5^\circ\text{C} + \text{ИЗДТ}$ ќе бидат исто така исти, т.е $\bar{c} \approx \bar{c}$. Со оглед на тоа дека е:

$$\bar{c} = \frac{\sigma_M}{\bar{p}} \quad \text{и} \quad \bar{c} = \frac{\sigma_x}{\bar{p}},$$

следува

$$\frac{\sigma_x}{\bar{p}} \approx \frac{\sigma_M}{\bar{p}},$$

од каде што се добива следната приближна релација:

$$\sigma_x \approx \sigma_M \cdot \frac{\bar{p}}{\bar{p}}. \quad (6.112)$$

На тој начин ја добиваме приближната (почетната) вредност на непознатото напрегање σ_x . Потоа, знаејќи ја вредноста на напрегањето во спроводникот во точката на обесување σ_{id} , со помош на приближната вредност за σ_x и релацијата (6.111), ќе ја добиеме и почетната вредност на граничниот распон:

$$a_{gr} = 2 \cdot \frac{\sigma_x}{\bar{p}} \cdot \operatorname{Ar ch} \frac{\sigma_{id}}{\sigma_x} = 2 \cdot \frac{\sigma_x}{\bar{p}} \cdot \ln \left(\frac{\sigma_{id}}{\sigma_x} + \sqrt{\frac{\sigma_{id}^2}{\sigma_x^2} - 1} \right). \quad (6.113)$$

Вредноста на граничниот распон, добиена на тој начин, не е сосема точна. Доколку сакаме да ја уточниме, ќе треба повеќекратно да ја примениме следната постапка.

За претходно пресметаната вредност на a_{gr} , најнапред, со помош на равенката на состојбата (6.87) и (6.88) ќе ја пресметаме вредноста σ_x на хоризонталната компонента на напрегањето:

$$n = \bar{\bar{p}} \cdot a_{gr} \cdot \sqrt{\frac{E}{24}}; \quad m = \frac{\bar{p}^2 \cdot a_{gr}^2}{24 \sigma_M^2} \cdot E - \sigma_M; \quad \sigma_x + m = (n / \sigma_x)^2. \quad (6.114)$$

Потоа, со новопресметаната вредност на напрегањето σ_x и со помош на (6.111) односно (6.113) ја пресметуваме новата вредност на граничниот распон a_{gr} , и т.н. Обично итеративната постапка за пресметување на граничниот распон е прилично конвергентна и дава решение со задоволителна точност после две до три итерации.

Пример 6.8. Да се пресмета граничниот распон за челичното јаже изработено од \check{C} III со номинален пресек 50 mm^2 за кого е познато: $d = 9 \text{ mm}$; $A = 49,48 \text{ mm}^2$; $p = 0,0078 \text{ daN/mm}^2$; $E = 17160 \text{ daN/mm}^2$; $\alpha = 11 \cdot 10^{-6} \text{ 1}^\circ\text{C}$; ($\Delta p_n = g/A = 0,18 \cdot \sqrt{d} / A = 0,011 \text{ daN/m,mm}^2$), за следните два случаја:

- а) факторот на НЗДТ изнесува $k_n = 1,0$ ($\Delta p_n = 1,0 \cdot g/A = 0,011 \text{ daN/m,mm}^2$)
- б) факторот на НЗДТ изнесува $k_n = 1,6$ ($\Delta p_n = 1,6 \cdot g/A = 0,018 \text{ daN/m,mm}^2$).

Максималното работно напрегање на јагето изнесува $\sigma_M = 26 \text{ daN/mm}^2$, а исклучителното дозволеното напрегање $\sigma_{id} = 90 \text{ daN/mm}^2$. Факторот на исклучителен зимски додатен товар (ИЗДТ) изнесува $k_i = 2,0$ ($\Delta p_i = 2,0 \cdot \Delta p_n$).

Решение:

Во случајот под „а“ ќе имаме:

$$\Delta p = k_n \cdot g/A = 1,0 \cdot 0,011 = 0,011 \text{ daN/m,mm}^2;$$

$$\bar{p} = p + \Delta p = (0,0078 + 0,011) = 0,0188 \text{ daN/m,mm}^2;$$

$$\Delta \bar{p} = k_i \cdot \Delta p = 2,0 \cdot 0,011 = 0,022 \text{ daN/m,mm}^2;$$

$$\bar{\bar{p}} = p + \Delta \bar{p} = 0,0078 + 0,022 = 0,0298 \text{ daN/m,mm}^2;$$

$$\sigma_x = \sigma_M \cdot (\bar{\bar{p}} / \bar{p}) = 26 \cdot (0,0298 / 0,0188) = 41,183 \text{ daN/m,mm}^2;$$

$$\zeta = (\sigma_{id} / \sigma_x) = 90 / 41,183 = 2,185$$

$$a_{gr} = \frac{2\sigma_x}{\bar{\bar{p}}} \cdot \ln(\zeta + \sqrt{\zeta^2 - 1}) = \frac{2 \cdot 41,183}{0,0297} \cdot \ln(2,185 + \sqrt{2,185^2 - 1}) = 3932,5 \text{ m}.$$

Со вака пресметаната вредност за граничниот распон, влегуваме во првата итерација:

$$\text{I итерација: } m = 5724,14; \quad n = 3122,92; \quad \sigma_x + m = (n / \sigma_x)^2;$$

$$\text{I решение: } \sigma_x = 41,129 \text{ daN/mm}^2; \quad a_{gr} = 3931,4 \text{ m}.$$

II итерација: $m = 5720,92$; $n = 3122,05$; $\sigma_{x+m} = (n/\sigma_x)^2$;

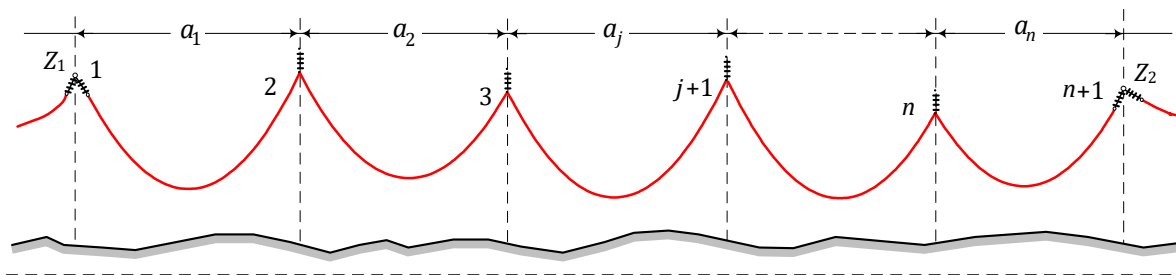
II решение: $\sigma_x = 41,1293 \text{ daN/mm}^2$; $a_{gr} = 3931,5 \text{ m}$, и.т.н.

На сличен начин се добива вредноста на граничниот распон и за случајот под „б“. Решението во тој случај гласи: $\sigma_x = 43,9138 \text{ daN/mm}^2$; $a_{gr} = 2757,8 \text{ m}$.



6.2.11 Идеален распон

Во сите досегашни анализи се посматраше спроводник односно заштитно јаже во даден распон a со константна должина. Според тоа, изведувањата што беа направени врз основа на оваа претпоставка ќе важат само за надземните водови со потпорни изолатори кај кои навистина спроводниците се фиксно зацврстени за изолаторите и должините на поедините распони од водот се константни. Кај надземните водови со висечки изолатори (изолаторски синџири), изолаторите можат слободно да се изместуваат од вертикалната положба во било кој правец, поради што, распонот помеѓу секои два соседни столба од затезното поле во општ случај не е константен, па навидум, односите што важеа кај фиксните распони, овде повеќе нема да важат. Меѓутоа, ќе видиме дека сите досега изведени закони на далекуводната механика ќе важат и во последниов случај, но за таа цел ќе биде неопходно да се воведат една нова математичка величина, наречена *идеален распон*.



Слика 6.14 Затезно поле од еден надземен вод

Поради тоа што висечките изолатори можат слободно да се изместуваат од вертикалната положба, произлегува дека хоризонталната компонента на напрегањето σ во едно затезно поле (кај кое спроводниците се фиксно зацврстени само при затезните столбови) ќе биде за сите распони иста. Да се вратиме сега на равенката на состојбата (6.86), напишана за произволен распон a_j (слика 6.14):

$$\frac{p^2 \cdot a_j^2}{24\sigma^2} - \frac{p_0^2 \cdot a_j^2}{24\sigma_0^2} = \alpha \cdot (\theta - \theta_0) + \frac{\sigma - \sigma_0}{E} ; \quad j = 1, 2, \dots, n . \quad (6.115)$$

Поедините членови во равенката (6.115) претставуваат некакви релативни издолжувања на спроводникот во j -тиот распон, и како такви, тие се без димензија. Ако сакаме да утврдиме колкава е вистинската промена Δl_j на должината на спроводникот во распонот a_j поради промената на состојбата на спроводникот, според изложеното во точките 6.2.4 и 6.2.6 ќе треба целата равенка (6.115) да ја помножиме со a_j . На тој начин добиваме:

$$\frac{p^2 \cdot a_j^3}{24\sigma^2} - \frac{p_0^2 \cdot a_j^3}{24\sigma_0^2} = a_j \cdot \alpha \cdot (\theta - \theta_0) + a_j \cdot \frac{\sigma - \sigma_0}{E} ; \quad j = 1, 2, \dots, n. \quad (6.116)$$

Ако за секој распон од посматраното затезно поле напишеме по една равенка од типот (6.116) и потоа извршиме нивно сумирање, ќе добиеме:

$$\sum_{j=1}^n \frac{p^2 \cdot a_j^3}{24\sigma^2} - \sum_{j=1}^n \frac{p_0^2 \cdot a_j^3}{24\sigma_0^2} = \sum_{j=1}^n a_j \cdot \alpha \cdot (\theta - \theta_0) + \sum_{j=1}^n a_j \cdot \frac{\sigma - \sigma_0}{E} . \quad (6.117)$$

или:

$$\frac{p^2}{24\sigma^2} \cdot \sum_{j=1}^n a_j^3 - \frac{p_0^2}{24\sigma_0^2} \cdot \sum_{j=1}^n a_j^3 = \alpha \cdot (\theta - \theta_0) \cdot \sum_{j=1}^n a_j + \frac{\sigma - \sigma_0}{E} \cdot \sum_{j=1}^n a_j . \quad (6.118)$$

Ако обете страни од (6.118) ги поделиме со $\sum a_j$, ќе добиеме:

$$\frac{p^2}{24\sigma^2} \cdot \frac{\sum_{j=1}^n a_j^3}{\sum_{j=1}^n a_j} - \frac{p_0^2}{24\sigma_0^2} \cdot \frac{\sum_{j=1}^n a_j^3}{\sum_{j=1}^n a_j} = \alpha \cdot (\theta - \theta_0) + \frac{\sigma - \sigma_0}{E} . \quad (6.119)$$

односно:

$$\frac{p^2 \cdot a_i^2}{24\sigma^2} - \frac{p_0^2 \cdot a_i^2}{24\sigma_0^2} = \alpha \cdot (\theta - \theta_0) + \frac{\sigma - \sigma_0}{E} . \quad (6.120)$$

Во релацијата (6.120), со a_i е означен т.н. *идеален распон*, дефиниран со (6.121):

$$a_i = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n a_j^3}{\sum_{j=1}^n a_j}} = \sqrt{\frac{a_1^3 + a_2^3 + \dots + a_n^3}{a_1 + a_2 + \dots + a_n}} . \quad (6.121)$$

Според тоа, математичката релација помеѓу параметрите на две различни состојби на спроводниците од едно затезно поле и понатаму ќе го има обликот на равенката на состојбата (6.86), само што во неа ќе треба да фигурира идеалниот распон на затезното поле a_i , пресметан со помош на (6.121). Кога во затезното поле постојат и коси распони со релативно големи денивелации Δh_i и големи агли на наклон ψ_i , тогаш идеалниот распон на затезното поле ќе се пресметува со помош на релациите (6.122) [2]:

$$a_i = \frac{\sum_{j=1}^n c_j^3 / a_j^2}{\sum_{j=1}^n c_j^2 / a_j} \cdot \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n a_j^3}{\sum_{j=1}^n c_j^2 / a_j}} . \quad (6.122)$$

Во (6.122), со $c_j = \sqrt{a_j^2 + \Delta h_j^2} = \frac{a_j}{\cos \psi_j}$ е означена косо мерената должина на распонот a_j ,

т.е.

$$c_j = \sqrt{a_j^2 + \Delta h_j^2} = \frac{a_j}{\cos \psi_j} ; \quad j = 1, 2, \dots, n. \quad (6.122 \text{ a})$$

На идеалниот распон a_i му соодветствува идеален повес f_i :

$$f_i = \frac{p \cdot a_i^2}{8\sigma} \quad (6.123)$$

Идеалниот провес f_i е воведен по аналогија на релацијата (6.39). Значи, како и идеалниот распон a_i , провесот f_i исто така претставува некоја помошна, чисто математичка величина, која што служи за пресметување на провесите на спроводниците во поедините распони од затезното поле.

Провесот f_j во j -тиот распон ($j = 1, n$) при некое напрегање на спроводникот σ , според (6.39) ќе биде:

$$f_j = \frac{p \cdot a_j^2}{8\sigma} \quad ; \quad j = 1, n \quad . \quad (6.124)$$

или со оглед на (6.123):

$$f_j = f_i \cdot \frac{a_j^2}{a_i^2}; \quad j = 1, n. \quad (6.125)$$

Релацијата (6.125) е општа и важи за секоја состојба на спроводникот и за секоја температура θ .

Пример 6.9. Да се пресмета идеалниот распон за затезното поле анализирано во примерот 6.2. Затезно поле се состои од три распони: $a_1 = 290$ m; $a_2 = 300$ m; $a_3 = 330$ m.

Решение:

Во согласност со формулата (6.121) ќе имаме:

$$a_i = \sqrt{\frac{a_1^3 + a_2^3 + a_3^3}{a_1 + a_2 + a_3}} = \sqrt{\frac{290^3 + 300^3 + 330^3}{290 + 300 + 330}} = 308,1 \text{ m.}$$



Пример 6.10. Затезно поле се состои од четири распони: $a_1 = 260$ m; $a_2 = 280$ m; $a_3 = 340$ m и $a_4 = 320$ m. Спроводниците во затезното поле се комбинирани јажиња ЈУС Н.Ц1. 351-А1/Џ-240/40 ($p = 3,426 \cdot 10^{-3}$ daN/m, mm²) а хоризонталната компонента на напрегањето при температура $\theta = 40^\circ\text{C}$ изнесува $\sigma_{40} = 4,5$ daN/mm². Да се определи вредноста на идеалниот распон a_i како и провесите во поедините распони од затезното поле.

Должината на затезното поле во случајов ќе изнесува:

$$\Sigma a_j = 260 + 280 + 340 + 320 = 1200 \text{ m. Понатаму имаме:}$$

$$\Sigma a_j^3 = 260^3 + 280^3 + 340^3 + 320^3 = 1,116 \cdot 10^8 \text{ m}^3.$$

Според тоа, идеалниот распон на посматраното затезно поле ќе биде:

$$a_i = \sqrt{\frac{\Sigma a_j^3}{\Sigma a_j}} = \sqrt{\frac{1,116 \cdot 10^8}{1200}} = 305 \text{ m.}$$

Идеалниот провес f_i при температурата $\theta = 40^\circ\text{C}$ ќе изнесува:

$$f_i = \frac{p \cdot a_i^2}{8\sigma_{40}} = \frac{3,426 \cdot 10^{-3} \cdot 305^2}{8 \cdot 4,5} = 17,71 \text{ m} .$$

Провесите на спроводниците во одделните распони при оваа температура, според (6.125) ќе бидат:

$$f_1 = f_i \cdot \frac{a_1^2}{a_i^2} = 17,71 \cdot \left(\frac{260}{305}\right)^2 = 12,87 \text{ m},$$

$$f_2 = f_i \cdot \frac{a_2^2}{a_i^2} = 17,71 \cdot \left(\frac{280}{305}\right)^2 = 14,92 \text{ m},$$

$$f_3 = f_i \cdot \frac{a_3^2}{a_i^2} = 17,71 \cdot \left(\frac{340}{305}\right)^2 = 22,00 \text{ m},$$

$$f_4 = f_i \cdot \frac{a_4^2}{a_i^2} = 17,71 \cdot \left(\frac{320}{305}\right)^2 = 19,49 \text{ m},$$



Пример 6.11. Да се пресмета напрегањето на спроводниците за состојбата при минималната температура $\theta = -20^\circ\text{C}$ во затезното поле анализирано во примерот 6.2. Затезно поле се состои од три распони: $a_1 = 290 \text{ m}$; $a_2 = 300 \text{ m}$; $a_3 = 330 \text{ m}$. Познато е дека спроводниците се комбинирани Al/C 240/40 mm^2 ($p=3,426 \cdot 10^{-3} \text{ daN/m,mm}^2$; $E = 17000 \text{ daN/mm}^2$; $\alpha = 18,9 \cdot 10^{-6}/^\circ\text{C}$) и дека напрегањето при температура $\theta = +40^\circ\text{C}$ изнесува $\sigma_{40} = 3,675 \text{ daN/mm}^2$ (види пример 6.2).

Р е ш е н и е:

Бараното напрегање σ_{-20} ќе го добиеме со помош на равенката на состојбата која што ќе ја примениме на идеалниот распон од ова затезно поле, коешто, според решението од примерот 6.9 изнесува $a_i = 308,1 \text{ m}$. Притоа ќе ги посматраме следните две состојби:

- 1) старата (позната) состојба при $+40^\circ\text{C}$ за која важи: $p_1=p$; $\sigma_1 = \sigma_{40}$ и $\theta_1 = +40^\circ\text{C}$ и
- 2) новата (непозната) состојба, за која е: $p_2 = p$; $\sigma_2 = \sigma_{-20} = ?$ и $\theta_2 = -20^\circ\text{C}$.

Равенката на состојбата претставува математичка релација која дава врска помеѓу параметрите на овие две состојби. Со нејзината примена, на овие две состојби според (6.85), се добива:

$$\frac{p_2^2 \cdot a_i^2}{24 \cdot \sigma_2^2} - \frac{p_1^2 \cdot a_i^2}{24 \cdot \sigma_1^2} = \alpha \cdot (\theta_2 - \theta_1) + \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{E} .$$

Во оваа релација единствена непозната е бараното напрегање $\sigma_2 = \sigma_{-20} = ?$. Лесно може да се покаже (релација 6.85) дека ова напрегање се добива како решение на следната равенка од трет степен:

$$\sigma_{-20} + m = \frac{n^2}{\sigma_{-20}^2},$$

каде што, според (6.88) се:

$$m = \frac{p_1^2 \cdot a_i^2}{24 \cdot \sigma_1^2} \cdot E + \alpha \cdot E \cdot (\theta_2 - \theta_1) - \sigma_1 \quad \text{и} \quad n = p_2 \cdot a_i \cdot \sqrt{\frac{E}{24}}.$$

Понатаму имаме:

$$m = \frac{3,426^2 \cdot 308,1^2 \cdot 10^{-6}}{24 \cdot 3,675^2} \cdot 7700 + 18,9 \cdot 10^{-6} \cdot 7700 \cdot (-20 + 5) - 3,675 = 14,070,$$

$$n = 3,426 \cdot 10^{-3} \cdot 308,1 \cdot \sqrt{\frac{7700}{24}} = 18,91,$$

$$\sigma_{-20} + 14,070 = \frac{18,91^2}{\sigma_{-20}^2} \Rightarrow \sigma_{-20} = 4,4 \text{ daN/mm}^2.$$



Пример 6.12. Познато е дека далекуводот на којшто му припаѓа затезното поле, прикажано во примерот 6.2, е проектиран за следните климатски параметри:

- 1) фактор на нормален зимски додатен товар: $k_n = 1,6$
- 2) фактор на исклучителен зимски додатен товар: $k_i = 2,0$
- 3) максимален притисок на ветрот $P_{\max} = 75 \text{ daN/m}^2$.

Со помош на равенката на состојбата, тргнувајќи од познатата состојба при $+40^\circ\text{C}$, при која што напрегањето изнесува $\sigma_{40} = 3,675 \text{ daN/mm}^2$, да се пресметаат напрегањата:

- 1) $\bar{\sigma}_{-5}$ при температура -5°C со нормален зимски додатен товар (НЗДТ) и
- 2) $\bar{\bar{\sigma}}_{-5}$ при температура -5°C со исклучителен зимски додатен товар (ИЗДТ).

Дали од добиените резултати може да се заклучи за кое максимално напрегање σ_M е проектиран овој далекувод.

Решение:

Во овој случај најнапред ќе ги пресметаме параметрите на јажето (Al/Ѓ 240/40) p , $\bar{p} = p + \Delta p_n$ и $\bar{\bar{p}} = p + \Delta p_i$ за состојбите без ЗДТ, со НЗДТ и со ИЗДТ. Притоа имаме:

$$p = G / A = 0,968 / 282,5 = 3,4265 \cdot 10^{-3} \text{ daN/m,mm}^2$$

$$g = 0,18 \cdot \sqrt{d} = 0,18 \cdot \sqrt{21,9} = 0,842 \text{ daN/m},$$

$$g / A = 0,842 / 282,5 = 2,892 \cdot 10^{-3} \text{ daN/m,mm}^2,$$

$$\Delta p_n = k_n \cdot (g / A) = 1,6 \cdot 2,892 \cdot 10^{-3} = 4,771 \cdot 10^{-3} \text{ daN/m,mm}^2,$$

$$\Delta p_i = k_i \cdot \Delta p_n = 2 \cdot 4,771 \cdot 10^{-3} = 9,542 \cdot 10^{-3} \text{ daN/m,mm}^2,$$

$$\bar{p} = p + \Delta p_n = (3,4265 + 4,771) \cdot 10^{-3} = 8,197 \cdot 10^{-3} \text{ daN/m,mm}^2,$$

$$\bar{\bar{p}} = p + \Delta p_i = (3,4265 + 9,542) \cdot 10^{-3} = 12,968 \cdot 10^{-3} \text{ daN/m,mm}^2,$$

1) Пресметка на напрегањето $\bar{\sigma}_{-5}$ при температура -5°C +ИЗДТ

Во овој случај, работејќи со идеалниот распон $a_i = 308,1$ m од ова затезно поле, и поаѓајќи од познатата состојба при $\theta = 40^\circ\text{C}$, ќе ги посматраме следните две состојби:

- 1) стара (позната) состојба при $+40^\circ\text{C}$ за која важи: $p_1 = p$; $\sigma_1 = \sigma_{40}$ и $\theta_1 = +40^\circ\text{C}$ и
- 2) нова (непозната) состојба, за која е: $p_2 = \bar{p}$; $\sigma_2 = \bar{\sigma}_{-5} = ?$ и $\theta_2 = -5^\circ\text{C}$.

Со помош на равенката на состојбата, како и во Примерот 6.11, применувајќи ја на горните две состојби, добиваме:

$$\frac{p_2^2 \cdot a_i^2}{24 \cdot \sigma_2^2} - \frac{p_1^2 \cdot a_i^2}{24 \cdot \sigma_1^2} = \alpha \cdot (\theta_2 - \theta_1) + \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{E}.$$

Во оваа релација единствена непозната е бараното напрегање $\sigma_2 = \bar{\sigma}_{-5} = ?$. Лесно може да се покаже (релација 6.85) дека ова напрегање се добива како решение на следната равенка од трет степен:

$$\bar{\sigma}_{-5} + m = \frac{n^2}{\bar{\sigma}_{-5}^2},$$

каде што, се:

$$p_1 = p = 3,4265 \cdot 10^{-3} \text{ daN/m,mm}^2; \sigma_1 = \sigma_{40} = 3,675 \text{ daN/m,mm}^2 \text{ и } \theta_1 = 40^\circ\text{C}.$$

$$p_2 = \bar{p} = 8,197 \cdot 10^{-3} \text{ daN/m,mm}^2; \sigma_2 = \bar{\sigma}_{-5} = ? \text{ и } \theta_2 = -5^\circ\text{C}.$$

$$m = \frac{p_1^2 \cdot a_i^2}{24 \cdot \sigma_1^2} \cdot E + \alpha \cdot E \cdot (\theta_2 - \theta_1) - \sigma_1 = 16,253 \text{ и } n = p_2 \cdot a_i \cdot \sqrt{\frac{E}{24}} = 45,238.$$

Понатаму имаме:

$$\bar{\sigma}_{-5} + 16,253 = \frac{45,238^2}{\bar{\sigma}_{-5}^2} \Rightarrow \bar{\sigma}_{-5} = 9,0 \text{ daN/mm}^2.$$

Од добиениот резултат може да се заклучи дена набљудуваниот далекувод е проектиран со усвоено максимално работно напрегање $\sigma_M = 9 \text{ daN/mm}^2$.

2) Пресметка на напрегањето $\bar{\bar{\sigma}}_{-5}$ при температура -5°C +ИЗДТ

Во овој случај параметрите на познатата состојба се исти како и претходно, додека новата, непозната, состојба се однесува на состојбата при -5°C +ИЗДТ, т.е.:

$$p_1 = p = 3,4265 \cdot 10^{-3} \text{ daN/m,mm}^2; \sigma_1 = \sigma_{40} = 3,675 \text{ daN/m,mm}^2 \text{ и } \theta_1 = 40^\circ\text{C}.$$

$$p_2 = \bar{\bar{p}} = 12,968 \cdot 10^{-3} \text{ daN/m,mm}^2; \sigma_2 = \bar{\bar{\sigma}}_{-5} = ? \text{ и } \theta_2 = -5^\circ\text{C}.$$

На наполно ист начин како и во претходниот дел, за бараното напрегање добиваме:

$$m = \frac{p_1^2 \cdot a_i^2}{24 \cdot \sigma_1^2} \cdot E + \alpha \cdot E \cdot (\theta_2 - \theta_1) - \sigma_1 = 16,253 \text{ и } n = p_2 \cdot a_i \cdot \sqrt{\frac{E}{24}} = 71,567.$$

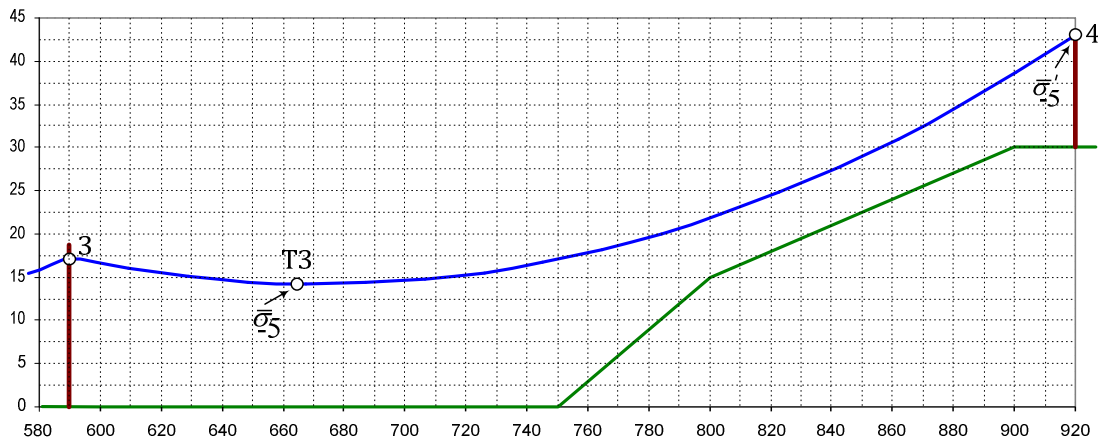
$$\bar{\sigma}_{-5} + 16,253 = \frac{71,567^2}{\bar{\sigma}_{-5}^2} \Rightarrow \bar{\sigma}_{-5} = 13,189 \text{ daN/mm}^2.$$

Значи, во состојбата при $-5^\circ\text{C} + \text{ИЗДТ}$ напрегањето во темето од синцирницата во вториот распон, коешто е наедно еднакво на хоризонталната компонента на напрегањето во целото затезно поле, е под дејство на ИЗДТ за 47% поголемо од истото напрегање во состојбата со НЗДТ.



Пример 6.13. Се посматра затезното поле од примерот 6.2 во состојбата при $\theta = -5^\circ\text{C} + \text{ИЗДТ}$ (слика П.6.13.1). Потребно е:

- а) Да се пресмета колкаво е вкупното напрегање $\bar{\sigma}'_{-5}$ во точката на обесување од левата страна на столбот бр. 4 што припаѓа на третиот распон. Дали ова напрегање ја надминува вредноста на исклучителното дозволено напрегање коешто за применетите јажиња изнесува $\sigma_{id} = 24,5 \text{ daN/mm}^2$.
- б) Да се утврди зависноста $\bar{\sigma}'_{-5} = f(k_i)$ на ова напрегање од факторот на ИЗДТ k_i . За која вредност на факторот исклучителен зимски додатен товар $k_i = k_{i,\text{критично}}$ се достигнува граничната дозвољена вредност $\bar{\sigma}'_{-5} = \sigma_{id} = 24,5 \text{ daN/mm}^2$.



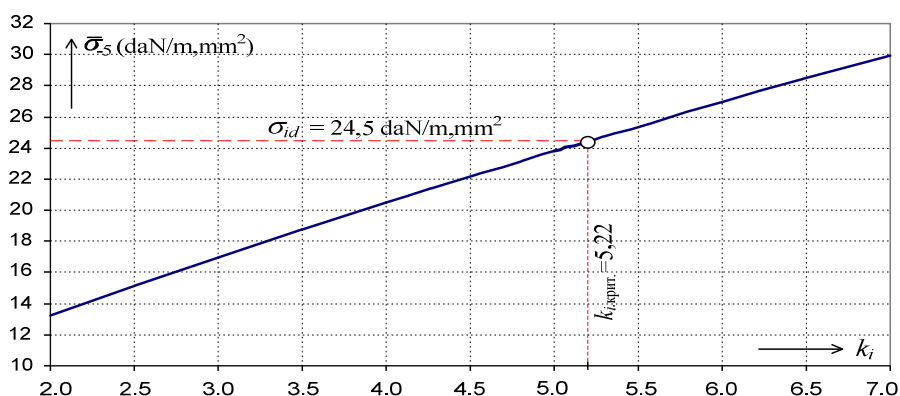
Слика П.6.13.2 Приказ на набљудуваниот распон

Решение:

На начин сосема идентичен на којшто во Примерот 6.12 е правена пресметката на напрегањето $\bar{\sigma}_{-5}$ при $-5^\circ\text{C} + \text{ИЗДТ}$, со повеќекратна примена на истата процедура, се добива табеларната зависност $\bar{\sigma}'_{-5} = f(k_i)$, прикажана во табелата П.6.13.1.1. Врз основа на неа, на сликата П.6.13.1.2 е прикажана графичкиот на истата таа зависност. Од графикот лесно се отчитува дека дури за факторот на ИЗДТ $k_{i,\text{критично}} = 5,22$ вкупното напрегање $\bar{\sigma}'_{-5}$ во точката на обесување при столбот бр. 3 ја достигнува најголемата дозвољена вредност $\bar{\sigma}'_{-5} = \sigma_{id} = 24,5 \text{ daN/mm}^2$.

Табела П.6.13.1. Зависност $\bar{\sigma}'_{-5} = f(k_i)$ на вкупното напрегање на јагето во точката на обесување

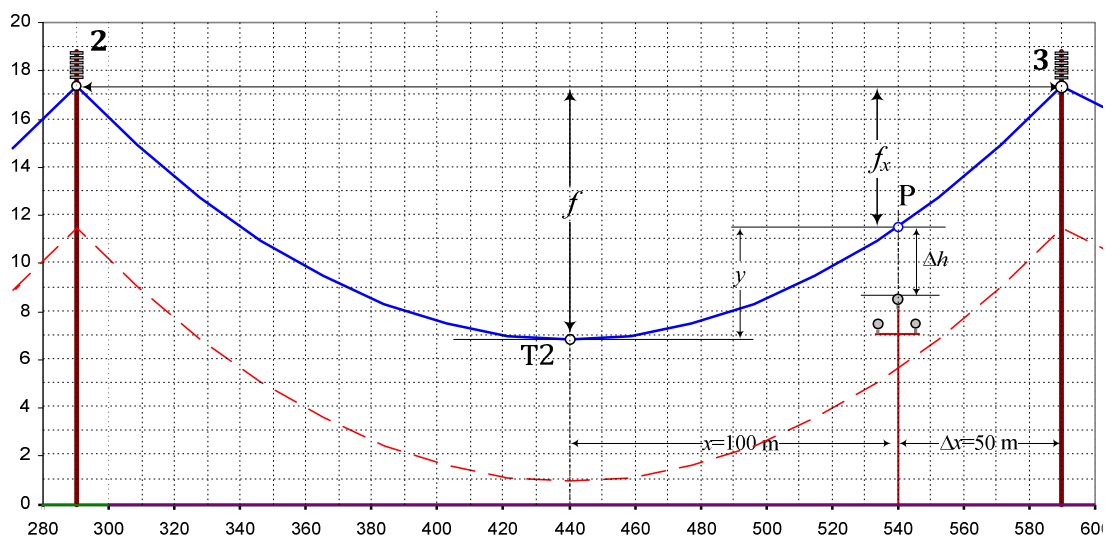
k_i	\bar{p} (daN/m,mm ²)	$\bar{\sigma}'_{-5}$ (daN/mm ²)	(%) од σ_{id}
2	$12,968 \cdot 10^{-3}$	13,189	53,8
3	$17,739 \cdot 10^{-3}$	16,981	69,3
4	$22,510 \cdot 10^{-3}$	20,493	83,6
5	$27,281 \cdot 10^{-3}$	23,791	97,1
5,22	$28,345 \cdot 10^{-3}$	24,500	100,0
6	$32,052 \cdot 10^{-3}$	26,920	109,9
7	$36,823 \cdot 10^{-3}$	29,909	122,1



Слика П.6.13.2 Графички приказ на зависноста $\bar{\sigma}'_{-5} = f(k_i)$



Пример 6.14. Се посматра вториот распон од затезното поле од примерот 6.2. Во скоро иднина се предвидува да се изгради нов, 10 kV далекувод којшто ќе се врстува со постојниот во овој распон. Притоа, трасата на новиот вод ќе минува на растојание $\Delta x = 50$ m лево од столбот бр. 3, а највисокиот спроводник од овој вод на местото на вкрстосување ќе изнесува $h_{10kV} = 8,6$ m.



Слика П.6.14.1 Позиција на 10 kV надземен вод во вториот распон од 110 kV вод

Да се провери дали во новите услови ќе бидат задоволени прописите во поглед на сигурносната височина според членот 152 од Правилникот којшто се однесува на потребните сигурносни височини при врстување на ВН вод со други електроенергетски водови и којшто изнесува $\Delta h_{\text{сиг.}} = 2,5 \text{ m}$. За состојбата при $\theta = 40^\circ\text{C}$ се познати се следните податоци: $\sigma_{40} = 3,675 \text{ daN/mm}^2$; $c_{40} = 1076,6 \text{ m}$; $f_{40} = 10,45 \text{ m}$.

Решение:

Оваа задача ќе ја решиме на два начина: 1) класично, преку пресметка на координатите (X_P , Y_P) на точката „P“ од синцирницата којашто се наоѓа над највисокиот спроводник од 10 kV далекувод и 2) со примена на релацијата (6.84) за пресметка на провесот f_x во произволна точка од синцирницата „P“. Анализите, се разбира, ќе ги правиме за состојбата со најголеми провеси, а тоа е состојбата при максималната температура зашто критичната температура на спроводниците во случајов ќе биде:

$$\theta_k = \frac{\bar{\sigma}_{-5}}{E \cdot \alpha} \cdot \left(1 - \frac{P}{\bar{P}}\right) - 5 = \frac{9}{7700 \cdot 18,9 \cdot 10^{-6}} \cdot \left(1 - \frac{3,427 \cdot 10^{-3}}{8,198 \cdot 10^{-3}}\right) - 5 = 31^\circ\text{C} < 40^\circ\text{C}.$$

1) Пресметка на координатите (x , y) на точката „P“ на синцирницата

Во примерот 6.2 беше покажано дека за состојбата при $+40^\circ\text{C}$, кога е провесот на спроводниците е најголем и изнесува $f = 10,45 \text{ m}$, темето на синцирницата T2 ги има следните координати: $X_{T2} = 440 \text{ m}$; $Y_{T2} = 6,85 \text{ m}$. Растојанието од темето T2 до трасата на новиот во изнесува $x = 100 \text{ m}$, па за ординатата y на точката „P“, сметано во однос на локалниот координатен систем, поставен во темето T2, ќе имаме:

$$y = \frac{x^2}{2c} = \frac{100^2}{2 \cdot 1076,6} = 4,64 \text{ m}.$$

Според тоа, глобалните координати на точката „P“ ќе бидат:

$$X_P = X_{T2} + x = 440 + 100 = 540 \text{ m}; \quad Y_P = Y_{T2} + y = 6,85 + 4,64 = 11,49 \text{ m},$$

од каде што следува:

$$\Delta h = Y_P - h_{10\text{kV}} = 11,49 - 8,6 = 2,79.$$

2) Пресметка на растојанието Δh со помош на изразот (6.42)

Според изразот (6.42 б), помеѓу провесот f_b на синцирницата со распон a во произволна точка на растојание $b = \Delta x$ од нејзина десна точка на обесување и провесот f во средината од еден хоризонтален распон постои следната релација:

$$f_b = 4f \cdot \frac{b \cdot (a - b)}{a^2}.$$

врз основа на која, во согласност со сликата П.6.11.1, се добива:

$$f_x = 4f \cdot \frac{\Delta x \cdot (a_2 - \Delta x)}{a_2^2} = 4 \cdot 10,95 \cdot \frac{50 \cdot 250}{300^2} = 5,81 \text{ m}.$$

Според сликата П.6.14.1 ординатата на точката „P“ ќе биде:

$$Y_3 = Y_P + f_x \Rightarrow Y_P = Y_3 - f_x = 17,3 - 5,81 = 11,49 \text{ m}$$

од каде што за сигурносната височина повторно се добива истиот резултат:

$$\Delta h = Y_p - h_{10kV} = 11,49 - 8,6 = 2,79.$$

Бидејќи е $\Delta h > \Delta h_{\text{сиг.}}$ следува заклучокот дека условите за безбедност, пропишани со Правилникот за градба на надземни електроенергетски водови ќе биде задоволен.



Табела 6.3 Решение на равенката на состојбата за вредност на параметрите во интервалот $m \{-20 - 30\}$ и $n \{1 - 15\}$

m / n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
-20	20.00	20.01	20.02	20.04	20.06	20.09	20.12	20.16	20.20	20.24	20.29	20.35	20.41	20.47	20.53
-19	19.00	19.01	19.02	19.04	19.07	19.10	19.13	19.17	19.22	19.27	19.32	19.38	19.45	19.51	19.59
-18	18.00	18.01	18.03	18.05	18.08	18.11	18.15	18.19	18.24	18.30	18.36	18.42	18.49	18.57	18.65
-17	17.00	17.01	17.03	17.06	17.09	17.12	17.17	17.22	17.27	17.33	17.40	17.47	17.55	17.63	17.72
-16	16.00	16.02	16.04	16.06	16.10	16.14	16.19	16.24	16.30	16.37	16.45	16.53	16.61	16.70	16.80
-15	15.00	15.02	15.04	15.07	15.11	15.16	15.21	15.27	15.34	15.42	15.50	15.59	15.69	15.79	15.89
-14	14.01	14.02	14.05	14.08	14.13	14.18	14.24	14.31	14.39	14.48	14.57	14.67	14.77	14.88	15.00
-13	13.01	13.02	13.05	13.09	13.14	13.21	13.28	13.36	13.45	13.55	13.65	13.76	13.88	14.00	14.13
-12	12.01	12.03	12.06	12.11	12.17	12.24	12.32	12.42	12.52	12.63	12.74	12.87	13.00	13.14	13.28
-11	11.01	11.03	11.07	11.13	11.20	11.28	11.38	11.49	11.60	11.73	11.86	12.00	12.15	12.30	12.45
-10	10.01	10.04	10.09	10.16	10.24	10.34	10.45	10.57	10.71	10.85	11.00	11.16	11.32	11.49	11.66
-9	9.01	9.05	9.11	9.19	9.29	9.41	9.54	9.68	9.84	10.00	10.17	10.35	10.53	10.71	10.90
-8	8.02	8.06	8.14	8.24	8.36	8.50	8.65	8.82	9.00	9.19	9.38	9.57	9.77	9.97	10.17
-7	7.02	7.08	7.17	7.30	7.45	7.62	7.80	8.00	8.20	8.41	8.63	8.84	9.06	9.28	9.50
-6	6.03	6.11	6.23	6.39	6.58	6.78	7.00	7.23	7.46	7.69	7.93	8.16	8.40	8.63	8.86
-5	5.04	5.15	5.32	5.52	5.75	6.00	6.25	6.51	6.77	7.03	7.28	7.54	7.79	8.04	8.28
-4	4.06	4.22	4.45	4.72	5.00	5.29	5.58	5.86	6.15	6.42	6.70	6.97	7.23	7.49	7.75
-3	3.10	3.36	3.67	4.00	4.33	4.66	4.98	5.29	5.59	5.89	6.17	6.46	6.73	7.00	7.26
-2	2.21	2.59	3.00	3.39	3.76	4.12	4.46	4.79	5.11	5.41	5.71	6.00	6.28	6.56	6.83
-1	1.47	2.00	2.47	2.90	3.30	3.67	4.02	4.36	4.69	5.00	5.30	5.60	5.88	6.16	6.43
0	1.00	1.59	2.08	2.52	2.92	3.30	3.66	4.00	4.33	4.64	4.95	5.24	5.53	5.81	6.08
1	0.75	1.31	1.79	2.23	2.63	3.00	3.35	3.69	4.02	4.33	4.63	4.93	5.21	5.49	5.77
2	0.62	1.13	1.58	2.00	2.39	2.75	3.10	3.43	3.75	4.06	4.36	4.65	4.94	5.21	5.48
3	0.53	1.00	1.43	1.82	2.19	2.55	2.89	3.21	3.52	3.83	4.12	4.41	4.69	4.96	5.23
4	0.47	0.90	1.30	1.68	2.04	2.38	2.70	3.02	3.33	3.62	3.91	4.19	4.47	4.74	5.00
5	0.43	0.83	1.20	1.56	1.90	2.23	2.55	2.85	3.15	3.44	3.72	4.00	4.27	4.53	4.79
6	0.40	0.77	1.12	1.46	1.79	2.11	2.41	2.71	3.00	3.28	3.56	3.83	4.09	4.35	4.61
7	0.37	0.72	1.06	1.38	1.70	2.00	2.30	2.58	2.87	3.14	3.41	3.67	3.93	4.19	4.44
8	0.35	0.68	1.00	1.31	1.61	1.91	2.19	2.47	2.75	3.01	3.28	3.53	3.79	4.04	4.28
9	0.33	0.64	0.95	1.25	1.54	1.82	2.10	2.37	2.64	2.90	3.16	3.41	3.65	3.90	4.14
10	0.31	0.61	0.91	1.20	1.48	1.75	2.02	2.28	2.54	2.80	3.05	3.29	3.53	3.77	4.01
11	0.30	0.59	0.87	1.15	1.42	1.68	1.95	2.20	2.45	2.70	2.95	3.19	3.42	3.66	3.89
12	0.29	0.56	0.84	1.10	1.37	1.63	1.88	2.13	2.37	2.62	2.85	3.09	3.32	3.55	3.78
13	0.27	0.54	0.81	1.07	1.32	1.57	1.82	2.06	2.30	2.54	2.77	3.00	3.23	3.45	3.67
14	0.26	0.52	0.78	1.03	1.28	1.52	1.76	2.00	2.23	2.46	2.69	2.92	3.14	3.36	3.58
15	0.26	0.51	0.76	1.00	1.24	1.48	1.71	1.94	2.17	2.40	2.62	2.84	3.06	3.27	3.49
16	0.25	0.49	0.73	0.97	1.21	1.44	1.67	1.89	2.11	2.34	2.55	2.77	2.98	3.20	3.41
17	0.24	0.48	0.71	0.94	1.17	1.40	1.62	1.84	2.06	2.28	2.49	2.70	2.91	3.12	3.33
18	0.23	0.47	0.69	0.92	1.14	1.36	1.58	1.80	2.01	2.22	2.43	2.64	2.85	3.05	3.25
19	0.23	0.45	0.68	0.90	1.11	1.33	1.54	1.76	1.97	2.17	2.38	2.58	2.79	2.99	3.18
20	0.22	0.44	0.66	0.88	1.09	1.30	1.51	1.72	1.92	2.13	2.33	2.53	2.73	2.92	3.12
21	0.22	0.43	0.64	0.86	1.06	1.27	1.48	1.68	1.88	2.08	2.28	2.48	2.67	2.87	3.06
22	0.21	0.42	0.63	0.84	1.04	1.24	1.45	1.65	1.84	2.04	2.23	2.43	2.62	2.81	3.00
23	0.21	0.41	0.62	0.82	1.02	1.22	1.42	1.61	1.81	2.00	2.19	2.38	2.57	2.76	2.94
24	0.20	0.40	0.60	0.80	1.00	1.20	1.39	1.58	1.77	1.96	2.15	2.34	2.52	2.71	2.89
25	0.20	0.40	0.59	0.79	0.98	1.17	1.36	1.55	1.74	1.93	2.11	2.30	2.48	2.66	2.84
26	0.20	0.39	0.58	0.77	0.96	1.15	1.34	1.52	1.71	1.89	2.08	2.26	2.44	2.62	2.80
27	0.19	0.38	0.57	0.76	0.95	1.13	1.32	1.50	1.68	1.86	2.04	2.22	2.40	2.57	2.75
28	0.19	0.38	0.56	0.75	0.93	1.11	1.29	1.47	1.65	1.83	2.01	2.18	2.36	2.53	2.71
29	0.19	0.37	0.55	0.73	0.91	1.09	1.27	1.45	1.63	1.80	1.98	2.15	2.32	2.49	2.67
30	0.18	0.36	0.54	0.72	0.90	1.08	1.25	1.43	1.60	1.77	1.95	2.12	2.29	2.46	2.63

7 ОСНОВНИ ДИМЕНЗИИ НА СТОЛБОВИТЕ

Изборот на **растојанијата** помеѓу спроводниците, заштитните јажиња и **конструкцијата на столбот** е од посебно значење за **сигурноста** на работата на надземниот вод. Со **намалувањето** на овие растојанија се создаваат услови за зачестена појава на **прескоци** и електричен **лак (куса врска)** помеѓу спроводниците и заземјените делови од столбот, зголемување на можноста за **испреплетување** и **механичко оштетување** на спроводниците и јажињата итн. Како краен резултат тоа доведува до испад на далекуводот и прекин во електроснабдувањето на потрошувачите.

Од друга страна, со **зголемувањето** на истите тие растојанија се зголемува **сигурноста** во погонот но тоа пак е сврзано со зголемување на **цената** на чинење на водот бидејќи зголемувањето на должината на конзолите ќе доведе до поголеми моменти на свиткување и всукување, појако механичко димензионирање на столбовите и фундаментите, поголема тежина на секој столб итн.

Растојанието помеѓу спроводниците и заштитното јаже (јажиња) односно деловите од столбот, се определува така што за време на погонот **ќе биде обезбедена доволна цврстина на прескок помеѓу самите спроводници во распонот** како и доволна цврстина на прескок **помеѓу спроводниците и столбот**, т.е. заштитното јаже. За тоа подетално ќе стане збор во наредниот дел од текстот.

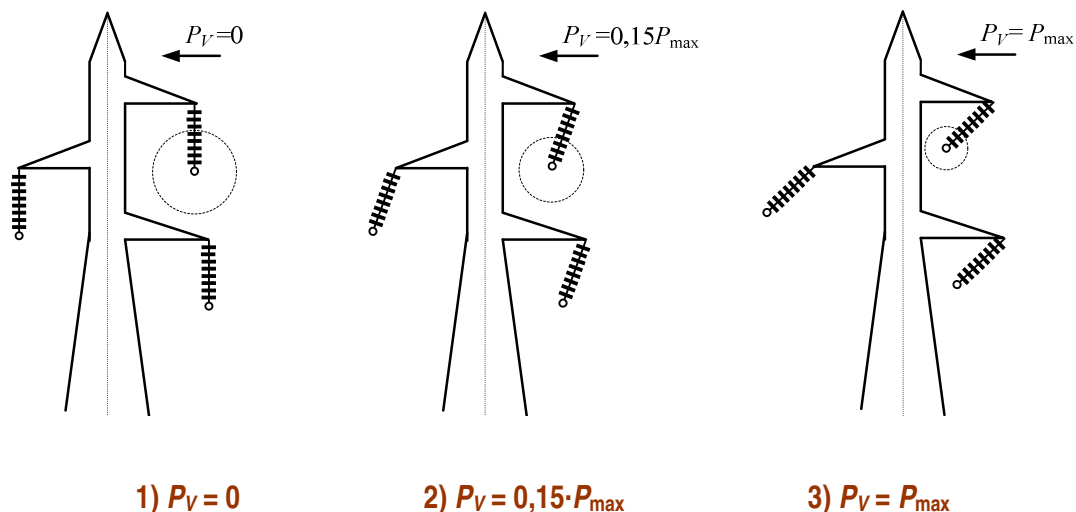
7.1 СИГУРНОСНИ РАСТОЈАНИЈА

Кај надземните водови изведени со челично–решеткасти и армирано–бетонски столбови, телото од секој столб се наоѓа на **потенцијал на земјата**, бидејќи самите столбови се заземјени директно со помош на сопствените заземјувачи и заземјувачите од соседните столбови, доколку водот е изведен со заштитно јаже. Затоа, секое **опасно приближување** или **допир** на спроводниците и конструкцијата на столбот ќе предизвика **електричен прескок** кој лесно може да премине во електричен **лак** т.е. **куса врска** на водот. За да биде погонот на водот доволно безбеден и сигурен, ќе треба да постојат некакви **ограничувања на минималните вредности** на растојанијата помеѓу спроводниците и деловите од столбот, како од аспект на делување на нормалниот погонски напон 50 Hz, така и од аспект на делување на комутационите (склопните) и атмосферските пренапони.

Во врска со тоа, во нашата земја постојат и соодветни прописи кои се изнесени во Правилникот [1] и со кои се дефинирани таканаречените **сигурносни растојанија**. **Сигурносно растојание е најмалото дозволено растојание** помеѓу деловите под напон (спроводници, споен прибор, заштитна арматура и др.), односно деловите под напон и заземјените делови од водот, било во нормални услови, било во услови кога делува ветер или зимски додатен товар.

Сигурносните растојанија треба да се проверуваат за следните **три случаи**:

1. при **неотклонет** изолаторски синцир, т.е. $P_V = 0$ (слика 7.1.1);
2. при **отклонет** изолаторски синцир, кога притисокот на ветрот изнесува 15% од полниот притисок на ветрот, т.е. $P_V = 0,15 \cdot P_{\max}$ (слика 7.1.2);
3. при **отклонет** изолаторски синцир, кога притисокот на ветрот изнесува 100% од полниот притисок на ветрот, т.е. $P = P_{\max}$ (слика 7.1.3).



Слика 7.1. Проверка на растојанијата помеѓу спроводниците и заземјените делови од столбот во разни погонски случаи

Во случаите нумерирани со „2“ и „3“, со P_{\max} е означен максималниот притисок на ветрот, кој се определува врз основа на кажаното во точката 6.1.2, со помош на табелата 6.2.

Големината на сигурносните растојанија d_s , изразени во cm, пропишани со Правилникот [1], се прикажани во табелата 7.1.

Табела 7.1 а. Сигурносни растојанија d_s кај СН надземните водови , (cm)

Номинален напон , kV	10	20	35
Вид на напонското напрегање на изолацијата:			
Случај 1. Атмосферски пренапони ($P_V = 0$)	15	25	35
Случај 2. Склопни и долготрајни пренапони ($P_V = 0,15 \cdot P_{\max}$)	10	20	30
Случај 3. Наизменични напони 50 Hz (нормална. работа $P_V = P_{\max}$)	/	7	10

Табела 7.1 б. Сигурносни растојанија d_s кај (ВН) надземните водови (cm)

Номинален напон , kV	110	220	380
Вид на напонското напрегање на изолацијата:			
Случај 1. Атмосферски пренапони ($P_V = 0$)	90	175	280
Случај 2. Склопни и долготрајни пренапони ($P_V = 0,15 \cdot P_{\max}$)	80	155	270
Случај 3. Наизменични напони 50 Hz (нормална. работа $P_V = P_{\max}$)	30	55	90

Како што се гледа од табелата 7.1, нормираните сигурносни растојанија се најголеми за атмосферските пренапони (случај „1“). Бидејќи можноста за совпаѓање на појава на атмосферски пренапон и ветар е занемарливо мала, проверката во тој случај се врши под претпоставката дека на спроводникот не делува никаков ветар. Можноста за совпаѓање на ветар и појава на комутациони пренапони на водот е мала, но сепак е

поголема отколку во претходниот случај, па затоа во случајот „2“ проверката ќе се врши под претпоставката дека врз спроводникот делува ветар со притисок $P_V = 0,15 P_{\max}$. И конечно, делувањето на ветрот со својот максимален притисок во стационарен режим на работа е извесно и сосема веројатно, па проверката на растојанијата на главата на столбовите во тој случај ќе се врши под претпоставката дека врз спроводниците дејствува **ветар со својот максимален притисок** ($P_V = P_{\max}$).

Приближувањето на спроводниците односно деловите под напон до конструкцијата на столбот е **најкритично** на носечките столбови со висечки изолатори. Кај водовите со потпорни изолатори, како и кај затезните столбови, каде што деловите под напон се цврсто фиксирани, сигурносните растојанија треба да се контролираат само за првиот случај, при неотклонета состојба на спроводниците. На столбовите со затезни изолаторски синцири треба да се контролира уште и приближувањето на спојните мостови до конструкцијата на столбот под дејство на ветрот, за случаите „2“ и „3“.

7.2. РАСТОЈАНИЈА ПОМЕЃУ СПРОВОДНИЦИТЕ И ЈАЖИЊАТА ВО СРЕДИНАТА ОД РАСПОНОТ

Растојанието во распонот помеѓу било кои два спроводника или помеѓу било кој спроводник и заштитното јаже (јажиња, доколку ги има две) треба да биде достаточо големо за да се обезбеди:

1 **осигурување на доволна електрична цврстина** на воздушната изолација помеѓу спроводниците и столбот, како и помеѓу самите спроводници *на главата на столбот*,

2 **осигурување на доволни изолациони растојанија во самиот распон** при појава на асинхронно нишање на спроводниците под дејство на ветрот, игра на спроводниците, потскокнување на спроводник при отпаѓање на зимскиот додатен товар, појава на нерамномерно оптоварување со ЗДТ на различните фази, поскокнување (галомирање) на спроводниците под дејство на турбулентното движење на воздушните маси и друго.

Ризикот од настанување на споменатите непожелни појави се зголемува со зголемување на провесите на спроводниците, т.е. распоните на водот – и обратно. Затоа **потребното растојание** помеѓу два соседни спроводника, односно помеѓу фазен спроводник и заштитно јаже треба да **зависи од големината на провесот** на спроводниците, т.е. посредно да зависи од големината на **распонот** на водот. Според нашите прописи, се смета дека барањето во поглед на оддалеченоста помеѓу спроводниците односно помеѓу спроводниците и заштитните јажиња во средината од распонот е исполнето ако растојанието помеѓу нив D во средината на распонот, во услови без ветар и на температура од $+40^\circ\text{C}$, изразено во см, изнесува $D \geq D_{\min}$, каде што минималното потребно растојание D_{\min} изнесува:

$$D_{\min} = k \cdot \sqrt{f_{40} + L_{iz}} + d_s \quad \text{см} . \quad (7.1)$$

Во релацијата (7.1) f_{40} е провесот на спроводникот, односно заштитното јаже, на температура 40°C , изразен во см, без оглед на усвоената максимална температура на спроводникот; L_{iz} е должина на изолаторскиот синцир до точката на зацврстувањето до спроводникот, изразена во см (за затезните изолаторски синцири како и за потпорните изолатори, во изразот (7.1) се зема $L_{iz} = 0$).

Сигурносното растојание d_s што фигурира во изразот (7.1) се изразува исто така во см. Тоа се зема од табелата 7.1 за случајот 1 (атмосферски пренапони) на неотклонети спроводници, во согласност со номиналниот напон на водот.

Во релацијата (7.1) фигурира **коэффициентот k** чија што вредност зависи од заемниот распоред на двата посматрани спроводника односно јажиња. Тој се пресметува со помош на еден од обрасците (7.2), во зависност од заемната положба на посматраните два спроводника/јажиња. Во нив фигурира аголот на отклон α на спроводникот односно заштитното јаже, изразен во степени, под дејство на вкупниот притисок на ветерот, определен според изложеното во точката 6.1.2. Притоа е:

$$k = 4 + \alpha/25 \text{ и } k \geq 6 \text{ и истовремено } D_{\min} = 60 \text{ cm, за хоризонтален распоред; (7.2a)}$$

$$k = 2 + \alpha/10 \text{ и } k \geq 7 \text{ и истовремено } D_{\min} = 70 \text{ cm, за кос распоред; (7.2б)}$$

$$k = 4 + \alpha/5 \text{ и } k \geq 14 \text{ и истовремено } D_{\min} = 140 \text{ cm, за вертикален распоред. (7.2в)}$$

Кај водовите со номинален напон $U_n \leq 20 \text{ kV}$ без оглед на распоредот на спроводниците, секогаш се работи со релацијата (7.2 а) што се однесува на хоризонталниот распоред.

За нисконапонските водови, минималното потребно растојание D_{\min} , изразено во cm, се пресметува според релацијата (7.3):

$$D_{\min} = 3 \cdot \sqrt{f_{40}} \text{ cm; (притоа провесот } f_{40} \text{ се изразува во cm), (7.3)}$$

но според нашите прописи, тое не смее да има вредност помала од:

- а) **30 cm** за хоризонтален и кос распоред на спроводниците и распони до 45 m;
- б) **40 cm** за хоризонтален и кос распоред на спроводниците и распони над 45 m;
- в) **40 cm** за вертикален распоред на спроводниците и распони до 45 m;
- г) **60 cm** за вертикален распоред на спроводниците и распони над 45 m.

□ □ □

Пример 7.1. На сликата е прикажана главата од еден двосистемски 110 kV носив столб, тип SD, производ на ЕМО-Охрид, наменет за изведба на двосистемски 110 kV надземни водови. Со помош на овој столб е изведено затезно поле (ЗП) од еден 110 kV надземен вод со следните карактеристики:

Идеален распон $a_i = 330.0 \text{ m}$;

Спроводници: Al/Č 240/40 mm²;

Напрегање: $\sigma_M = 9 \text{ daN/mm}^2$;

Заштитно јаже: Fe III 95 mm²;

Напрегање: $\sigma_M = 22 \text{ daN/mm}^2$;

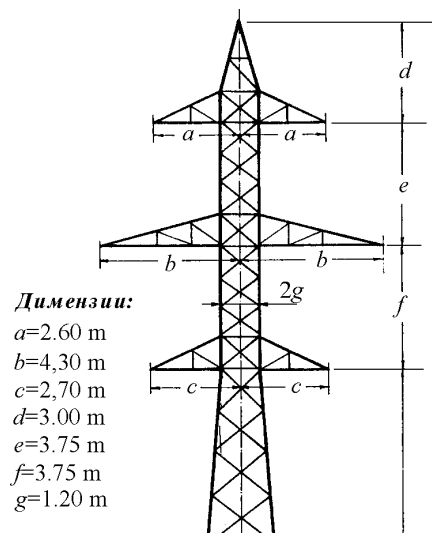
Напрегање при +40°C: $\sigma_{40} = 4,55 \text{ daN/mm}^2$

Притисок на ветерот: $P_V = 75 \text{ daN/m}^2$;

Фактор на НЗДТ: $k_n = 1,0$.

Носечките изолатори се од типот EN и нивната должина изнесува $L_{iz} = 1,5 \text{ m}$. Напрегањето на спроводниците при температура +40°C изнесува $\sigma_{40} = 4,55 \text{ daN/mm}^2$, додека напрегањето на заштитното јаже при истата температура изнесува $\sigma_{40Z} = 13,356 \text{ daN/mm}^2$.

**110 kV столб тип SD
производ на ЕМО-Охрид**



Да се изврши проверка на условите пропишани од Правилникот за градба на надземни водови во поглед растојанијата помеѓу спроводниците и јажињата при температура $\theta = +40^{\circ}\text{C}$ во средината од распонот и тоа:

- а) во третиот распон од затезното поле чија вредност изнесува $a_3 = 300\text{ m}$;
- б) во петтиот распон од затезното поле чија вредност изнесува $a_5 = 380\text{ m}$.

Проверката да се изврши само за спроводникот „А1“ од горната десна фаза и за заштитното јаже.

Решение:

Задачата ќе ја решиме само за случајот под а). Но пред да ја започнеме проверката ќе извршиме пресметка на провесите f_{40} и f_{40Z} на спроводниците и заштитното јаже при температура $+40^{\circ}\text{C}$ во посматраниот распон $a = 300\text{ m}$, нивната разлика Δf , а потоа и аглиите на отклон α и α_Z на спроводниците и з. јаже под дејство на ветрот:

$$f_{40} = \frac{p \cdot a_3^2}{8 \cdot \sigma_{40}} = \frac{3,427 \cdot 10^{-3} \cdot 300^2}{8 \cdot 4,55} = 8,47\text{ m};$$

$$f_{40Z} = \frac{p_Z \cdot a_3^2}{8 \cdot \sigma_{40Z}} = \frac{7,913 \cdot 10^{-3} \cdot 300^2}{8 \cdot 13,356} = 6,67\text{ m};$$

$$\Delta f = f_{40} - f_{40Z} = 8,472 - 6,667 = 1,80\text{ m}.$$

$$\alpha = \arctg \frac{P_V \cdot d}{G} = \arctg \frac{75 \cdot 21,9 \cdot 10^{-3}}{0,968} = 59,49^{\circ};$$

$$\alpha_Z = \arctg \frac{P_V \cdot d_Z}{G_Z} = \arctg \frac{75 \cdot 12,5 \cdot 10^{-3}}{0,738} = 51,8^{\circ}.$$

Ќе го решиме најнапред случајот со горниот лев фазен спроводник. Нека со А1, В1 и С1 ги означиме фазните спроводници од левата тројка, додека со А2, В2 и С2 ќе ги означиме фазните спроводници од десната тројка, како што е тоа прикажано на сликата 2. Ако координатниот почеток го поставиме така што Х-оската се поклопува со долната конзола додека Y-оската се поклопува со оската на симетрија на столбот, тогаш за координатите (x_i, y_i) на секој од 6-те фазни спроводници и заштитното јаже ќе добиеме:

спроводник	A1	B1	C1	A2	B2	C2	ZJ
x_i (m)	2.60	4.30	2.70	-2.60	-4.30	-2.70	0.00
y_i (m)	0.00	3.75	7.50	0.00	3.75	7.50	10.5

Со помош на оваа табела можеме да ги пресметаме заемните растојанија и распореди за секој пар спроводник-спроводник, односно спроводник-заштитно јаже.

Во најблиската околина на овој спроводник се наоѓаат спроводниците-јажињата означени со „А2“, ZJ“ и В1“. За секој од нив ќе го утврдиме заемниот распоред и соодветното растојание.

За релациите со преостанатите спроводници со кои спроводникот А1 се наоѓа во замен кос распоред нема да има потреба да ја вршиме таа проверка бидејќи тие се повеќе оддалечени од најблискиот спроводник В1 со кој посматраниот спроводник А1 се наоѓа во кос распоред.

1) *Пар спроводници „A1 – A2“*; распоред: хоризонтален

- вистинско растојание: $D_{A1-A2} = 2a = 5,20 \text{ m} \equiv 520 \text{ cm}$.

- коефициент k : $k = 4 + \frac{\alpha}{25} = 4 + \frac{59,49}{25} = 6,379$

- минимално потребно растојание:

$$D_{\min} = k \cdot \sqrt{f_{40} + L_{iz}} + d_S$$

$$= 6,379 \cdot \sqrt{847,2 + 150} + 90 = 291,5 \text{ cm}$$

2) *Пар спроводници „A1 – ZJ“*; распоред: кос

- вистинско растојание:

$$D_{A1-ZJ} = \sqrt{a^2 + (d + L_{iz} + \Delta f)^2} =$$

$$= \sqrt{2,6^2 + (3 + 1,5 + 1,8)^2} = 6,82 \text{ m} \equiv 682 \text{ cm} .$$

- коефициент k : $k = 2 + \frac{\alpha}{10} = 2 + \frac{59,49}{5} = 7,949$

- минимално потребно растојание:

$$D_{\min} = k \cdot \sqrt{f_{40} + L_{iz}} + d_S = 7,949 \cdot \sqrt{847,2 + 150} + 90 = 341 \text{ cm}.$$

3) *Пар спроводници „A1 – B1“*; распоред: кос

- вистинско растојание:

$$D_{A1-B1} = \sqrt{(b-a)^2 + e^2} = \sqrt{(4,3 - 2,6)^2 + (3,75)^2} = 4,17 \text{ m} \equiv 417 \text{ cm}.$$

- коефициент k : $k = 2 + \frac{\alpha}{10} = 2 + \frac{59,49}{5} = 7,949$

- минимално потребно растојание:

$$D_{\min} = k \cdot \sqrt{f_{40} + L_{iz}} + d_S = 7,949 \cdot \sqrt{847,2 + 150} + 90 = 341 \text{ cm}.$$

4) *Пар спроводници „A1 – C1“*; распоред: вертикален.

Иако во овој случај заемната положба на овие два спроводника не е строго вертикална, сепак, според Правилникот, доколку изместувањето Δx по хоризонталата е помало од величината d_S , тогаш се смета како да се работи за вертикален распоред на спроводниците. Според тоа, бидејќи е $\Delta x = 10 \text{ cm} < d_S = 90 \text{ cm}$, во овој случај ќе имаме:

- вистинско растојание:

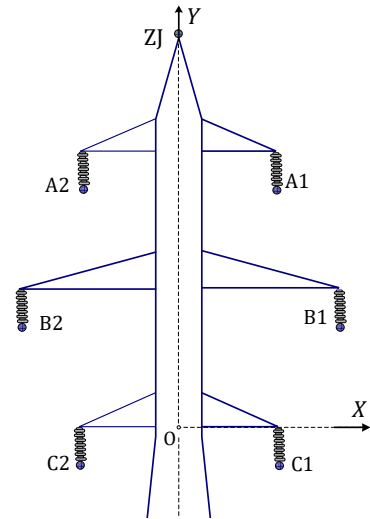
$$D_{A1-C1} = \sqrt{(c-a)^2 + (e+f)^2} = \sqrt{(2,7 - 2,6)^2 + (7,5)^2} = 7,51 \text{ m} \equiv 751 \text{ cm}.$$

- коефициент k : $k = 4 + \frac{\alpha}{5} = 4 + \frac{59,49}{5} = 15,897$

- минимално потребно растојание:

$$D_{\min} = k \cdot \sqrt{f_{40} + L_{iz}} + d_S = 15,897 \cdot \sqrt{847,2 + 150} + 90 = 592 \text{ cm}.$$

Проверката на останатите растојанија D_{A1-B2} , D_{A1-C1} и D_{A1-C2} , како што рековме, нема потреба да ја вршиме.



5) Пар спроводници „ZJ – A1“; распоред: кос

- вистинско растојание:

$$D_{ZJ-A1} = D_{A1-ZJ} = 682 \text{ cm.}$$

- коефициент k : $k = k_z = 4 + \frac{\alpha_z}{25} = 4 + \frac{51,8}{25} = 7,18$

- минимално потребно растојание:

$$D_{\min} = k_z \cdot \sqrt{f_{40z} + 0} + d_s = 7,18 \cdot \sqrt{666,7 + 0} + 90 = 262 \text{ cm.}$$

итн.

Постапката за контрола продолжува и за останатите парови спроводник-спроводник односно спроводник-јаже на наполно ист начин, па така се добиваат следните резултати:

1	комбинација	Δx (m)	Δy (m)	D (m)	распоред	k, k_z	f_{40}, f_{40z} (m)	D_{\min} (m)	тест
2	A1-A2	5.200	0.000	5.200	хориз.	6.379	8.472	2,92	√
3	A1-B1	1.700	3.750	4.117	кос	7.949	8.472	3,41	√
4	A1-ZJ	2.600	6.304	6.820	кос	7.949	8.472	3,41	√
5	A1-C1	0.100	7.500	7.501	верт.	15.897	8.472	5,92	√
6	A1-B2	6.900	3.750	7.853	кос	7.949	8.472	3,41	√
7	A1-C2	5.300	7.500	9.184	кос	7.949	8.472	3,41	√
8	B1-ZJ	4.300	10.054	10.935	кос	7.949	8.472	3,41	√
9	B1-A1	1.700	3.750	4.117	кос	7.949	8.472	3,41	√
10	B1-C1	1.600	3.750	4.077	кос	7.949	8.472	3,41	√
11	B1-A2	6.900	3.750	7.853	кос	7.949	8.472	3,41	√
12	B1-B2	8.600	0.000	8.600	хориз.	6.379	8.472	7,10	√
13	B1-C2	7.000	3.750	7.941	кос	7.949	8.472	3,41	√
14	C1-ZJ	2.700	13.804	14.066	кос	7.949	8.472	3,41	√
15	C1-A1	0.100	7.500	7.501	верт.	15.897	8.472	5,92	√
16	C1-B1	1.600	3.750	4.077	кос	7.949	8.472	3,41	√
17	C1-A2	5.300	7.500	9.184	кос	7.949	8.472	3,41	√
18	C1-B2	7.000	3.750	7.941	кос	7.949	8.472	341	√
19	C1-C2	5.400	0.000	5.400	хориз	7.949	8.472	341	√
20	ZJ-A1	2.600	6.304	6.820	кос	7.180	6.667	2,62	√
21	ZJ-B1	4.300	10.054	10.935	кос	7.180	6.667	2,62	√
22	ZJ-C1	2.700	13.804	14.066	кос	7.180	6.667	2,62	√

Гледаме дека во овој случај насекаде се задоволени одредбите од Правилникот бидејќи за секоја комбинација се добива $D > D_{\min}$. Најкритична е состојбата кај парот спроводници B1–C1 но и таму е исполнет бараниот услов.

Лесно може да се покаже дека дури за распони $a > 392 \text{ m}$ се нарушува потребниот услов во поглед на растојанието D_{A1-C1} . Тоа значи дека во сите распони од посматраното затезно поле чишто вредности се помали од 392 m , условите во поглед на потребните растојанија во средината од распонот при $+40^\circ\text{C}$ ќе бидат задоволени.

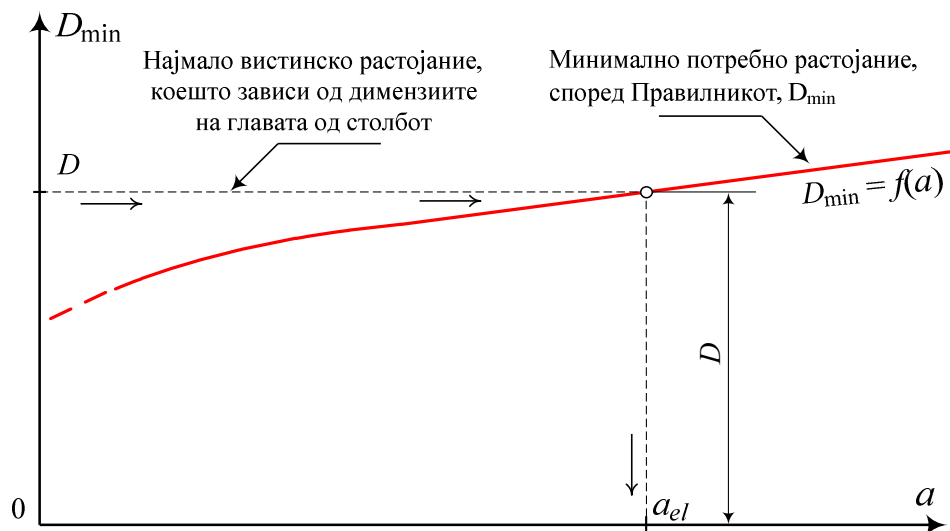
7.3 ЕЛЕКТРИЧЕН РАСПОН

7.3.1 Дефиниција

Како што претходно беше изложено, вистинското растојание D помеѓу било кои два спроводника или помеѓу било кој спроводник и заштитното јаже во средината од распонот при $\theta = 40^\circ\text{C}$ и во услови без ветар, според нашиот Правилник треба да биде најмалку еднакво на минималното потребно растојание D_{\min} , пресметано според (7.1)

$$D_{\min} = k \cdot \sqrt{f_{40} + L_{iz}} + d_s . \quad (7.4)$$

Од последниот израз заклучуваме дека тоа растојание **не е константно**, како што се, на пример, константни сигурносните растојанија d_s , сигурностите височини H_S односно сигурносните оддалечености D_S , туку тоа зависи од провесот на спроводникот во средината од распонот при $+40^\circ\text{C}$, f_{40} , т.е. **посредно зависи од распонот на водот a** . Колку е распонот a поголем, толку ќе биде поголем и провесот f_{40} , па според тоа ќе биде поголемо потребното растојание D_{\min} , предвидено со Правилникот – и обратно.



Слика 7.2 Зависност на минималното потребно растојание D_{\min} (според Правилникот) од големината на распонот. Графичка интерпретација на поимот “електричен распон”

Од друга страна, секој тип столб има точно определен распоред и димензии на својата глава, па според тоа тој ќе ги одржува спроводниците и заштитното јаже (јажиња) во точно определена заемна положба во просторот. Значи, растојанијата помеѓу спроводниците и јажињата во средината од распонот во услови без ветар се кај секој тип столб веќе однапред дефинирани, па на тој начин и големината на распонот за којшто сè уште ќе бидат задоволени одредбите на членот 30 од Правилникот е посредно, исто така, дефинирана.

Распонот на водот за кој што најмалото од растојанијата помеѓу спроводниците односно помеѓу спроводниците и заштитното јаже во средината од распонот при максималната температура $+40^\circ\text{C}$ и во услови без ветар е еднакви точно на минималното потребно растојание, пропишано со чл. 30 од нашиот Правилник, односно со релацијата (7.4), се нарекува **електричен распон a_{el}** . Неговата вредност зависи од **димензиите** на главата на столбот, но зависи и од **напрегањето** на спроводниците (јажињата)

σ_{40} при температурата $+40^\circ\text{C}$, т.е. посредно зависи од избраното **максимално работно напрегање σ_M** , **климатските параметри** (зимски додатен товар и притисок на ветрот), како и од механичките и физичките **карактеристики на спроводниците и јажињата**.

Знаејќи ги **димензиите на главата** на столбовите, може да се пресмета електричниот распон за секој столб. **Електричниот распон** понатаму **служи при проектирањето** на надземните водови, или поточно речено, се користи при **разместувањето** на столбовите долж трасата од водот. Доколку вистинските распони помеѓу столбовите се помали од соодветните електрични распони, тогаш тоа ќе значи дека одредбите од членот 30 во поглед на потребните растојанија помеѓу спроводниците и јажињата ќе бидат задоволени – и обратно.

7.3.2 Пресметување на електричниот распон

Електричниот распон на даден тип столб се пресметува на следниот начин. Бидејќи ја знаеме диспозицијата и димензиите на главата од столбот, можеме да сметаме дека најмалото вистинско растојание D помеѓу критичниот пар јажиња ни е познато. Бидејќи е познато и сигурносното растојание d_S (табела 7.1) и должината на изолаторскиот синцир L_{iz} , со помош на релацијата (7.4) можеме да ја пресметаме вредноста на провесот f_{40} што се има во електричниот распон:

$$f_{40} = \frac{(D - d_S)^2}{k^2} - L_{iz}. \quad (7.5)$$

Од друга страна, помеѓу провесот f_{40} и непознатиот распон a_{el} постои следната релација:

$$f_{40} = \frac{p \cdot a_{el}^2}{8 \cdot \sigma_{40}}, \quad (7.6)$$

во којашто на десната страна фигурираат непознатите a_{el} и σ_{40} . Од (7.6) следува:

$$a_{el}^2 = \frac{8 \cdot \sigma_{40} \cdot f_{40}}{p}. \quad (7.7)$$

Значи добивме една равенка со две непознати. За нивното пресметување ни е потребна уште една релација помеѓу непознатите a_{el} и σ_{40} . a_{el} и σ_{40} .

Кај реалните водови изведени со спроводници од Al или Al/Č јажиња, критичната температура θ_k е најчесто помала од 40°C , што значи дека провесот на спроводниците ќе биде најголем при максималната температура. Истовремено, водовите од економски причини се градат со распони кои се редовно поголеми од критичниот распон a_k а тоа пак од своја страна значи дека напрегањата се максимални при состојбата $\theta = -5^\circ\text{C}$ со зимски додатен товар. Со други зборови, почетната состојба кај водовите е најчесто состојбата при $-5^\circ\text{C} + \text{НЗДТ}$. Бидејќи во случајов нас нè интересира состојбата при $+40^\circ\text{C}$, напрегањето σ_{40} електричниот распон ќе го пресметаме применувајќи ја равенката на состојбата (6.87):

$$\sigma_{40} + m = \frac{n^2}{\sigma_{40}^2}. \quad (7.8)$$

каде што е, во согласност со (6.88):

$$m = \frac{\bar{p}^2 \cdot a_{el}^2}{24 \cdot \sigma_M^2} \cdot E + \alpha \cdot E \cdot (40+5) - \sigma_M, \quad (7.9)$$

$$n = p \cdot a_{el} \cdot \sqrt{E/24}. \quad (7.10)$$

Врз основа на (7.8) можеме да пишуваме:

$$\sigma_{40}^2 \cdot (\sigma_{40} + m) = n^2. \quad (7.11)$$

Со замена на изразите за m и n од (7.9) и (7.10) во (7.11) добиваме:

$$\sigma_{40}^2 \cdot \left(\sigma_{40} + \frac{\bar{p}^2 \cdot a_{el}^2}{24 \cdot \sigma_M^2} \cdot E + \alpha \cdot E \cdot 45 - \sigma_M \right) = p^2 \cdot a_{el}^2 \cdot \frac{E}{24}. \quad (7.12)$$

Бидејќи е според (7.6):

$$a_{el}^2 = \frac{8 \cdot \sigma_{40} \cdot f_{40}}{p}, \quad (7.13)$$

со замена на a_{el}^2 од (7.13) во (7.12) се добива:

$$\sigma_{40}^2 \cdot \left(\sigma_{40} + \frac{8 \cdot \bar{p}^2 \cdot E \cdot f_{40}}{24 \cdot p \cdot \sigma_M^2} \cdot \sigma_{40} + 45 \cdot \alpha \cdot E - \sigma_M \right) = p^2 \cdot \frac{8 \cdot \sigma_{40} \cdot f_{40}}{p} \cdot \frac{E}{24}. \quad (7.14)$$

После делењето на равенката (7.14) со σ_{40} и после нејзиното средување се добива следната релација:

$$\sigma_{40}^2 \cdot \left(1 + \frac{\bar{p}^2 \cdot E \cdot f_{40}}{3 \cdot p \cdot \sigma_M^2} \right) + (45 \cdot \alpha \cdot E - \sigma_M) \cdot \sigma_{40} - \frac{p \cdot E \cdot f_{40}}{3} = 0, \quad (7.15)$$

или:

$$\sigma_{40}^2 + A \cdot \sigma_{40} - B = 0, \quad (7.16)$$

каде што е:

$$A = \frac{3 \cdot p \cdot \sigma_M^2 \cdot (45 \cdot \alpha \cdot E - \sigma_M)}{3 \cdot p \cdot \sigma_M^2 + \bar{p}^2 \cdot E \cdot f_{40}}; \quad B = \frac{p^2 \cdot \sigma_M^2 \cdot E \cdot f_{40}}{3 \cdot p \cdot \sigma_M^2 + \bar{p}^2 \cdot E \cdot f_{40}} \quad (7.17)$$

Позитивното решение на равенката (7.16) ќе биде:

$$\sigma_{40} = \frac{-A + \sqrt{A^2 + 4 \cdot B}}{2}. \quad (7.18)$$

После пресметувањето на напрегањето σ_{40} во електричниот распон, со веќе познатиот провес f_{40} , пресметан според (7.5), и со помош на релацијата (7.13), може да се пресмета непознатата вредност на електричниот распон a_{el} :

$$a_{el} = \sqrt{\frac{8 \cdot f_{40} \cdot \sigma_{40}}{p}}. \quad (7.19)$$

Оваа постапка ќе треба да се спроведе за секој пар фазен спроводник–фазен спроводник (или барем за оној пар со најмало меѓусебно растојание). За надземните водови со заштитно јаже ќе биде потребно оваа постапка да се повтори уште два пати: еднаш за комбинацијата фазен спроводник–заштитно јаже, а потоа и за комбинацијата заштитно јаже–најблизок фазен спроводник. Во тој случај ќе имаме:

$$D_z = k_z \cdot \sqrt{f_{40z} + 0} + d_s, \quad (7.20)$$

од каде што најнапред следува пресметување на провесот f_{40Z} на заштитното јаже:

$$f_{40Z} = \left(\frac{D_Z - d_S}{k_Z} \right)^2. \quad (7.21)$$

а потоа, со помош на (7.17) пресметка на константите A_Z и B_Z . Сега, со решавање на квадратната равенка (7.15), со истата постапка што беше спроведена во претходниот случај, се пресметува напрегањето σ_{40Z} на јажето, а потоа и бараната вредност a_{elZ} :

$$a_{elZ} = \sqrt{\frac{8 \cdot f_{40Z} \cdot \sigma_{40Z}}{p_Z}}. \quad (7.22)$$

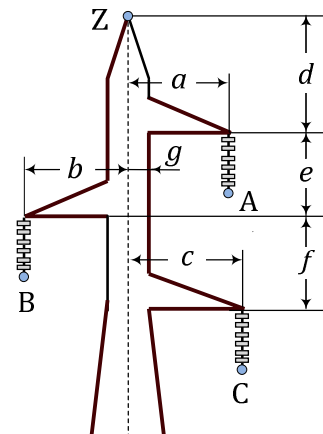
Вистинската вредност на електричниот распон на посматраниот столб ќе ја даде помалата од вредностите a_{el} и a_{elZ} , пресметани според (7.19) и (7.22), т.е:

$$a_{el} = \min \left[\sqrt{\frac{8 \cdot f_{40} \cdot \sigma_{40}}{p}}, \sqrt{\frac{8 \cdot f_{40Z} \cdot \sigma_{40Z}}{p_Z}} \right]. \quad (7.23)$$

□ □ □

Пример 7.2. На сликата се прикажани димензиите и диспозицијата на главата на носечкиот столб тип „S“ производ на ЕМО–Охрид. Да се пресмета електричниот распон за овој столб ако се познати следните податоци:

- 1) Димензии на главата на столбот (cm):
 $a=260$; $b=260$; $c=290$; $d=300$; $e=185$; $f=185$; $g=60$;
- 2) Спроводници: јаже MKS.N.C1.351–Al/Č–240/40;
- 3) Зашитно јаже: јаже MKS.N.C1.702 Č III 50;
- 4) Притисок на ветрот: $P_V = 75 \text{ daN/m}^2$;
- 5) Фактор на НЗДТ: $k_n = 1,0$
- 6) Мах. раб. напрегање на спровод.: $\sigma_M = 9 \text{ daN/mm}^2$;
- 7) Мах. раб. напрегање на з. јаже: $\sigma_{MZ} = 26 \text{ daN/mm}^2$;



Слика П.7.2.1.

- 8) Должина на изолаторскиот синџир: $L_{iz} = 1,45 \text{ m} = 145 \text{ cm}$;

Спроводниците и заштитното јаже ги имаат следните к-ки

Спроводници:

$$A = 282.5 \text{ mm}^2$$

$$d = 21,9 \text{ mm}$$

$$M = 0,987 \text{ kg/m}$$

$$G = 0,968 \text{ daN/m}$$

$$E = 7700 \text{ daN/mm}^2$$

$$\alpha = 18,9 \cdot 10^{-6} \text{ 1/}^\circ\text{C}$$

$$p = G/A = 0,003426 \text{ daN/m,mm}^2$$

$$\bar{p} = p + \Delta p = 0,006408 \text{ daN/m,mm}^2$$

Заштитно јаже:

$$A_Z = 48,36 \text{ mm}^2$$

$$d_Z = 9 \text{ mm}$$

$$M_Z = 0,384 \text{ kg/m}$$

$$G_Z = 0,377 \text{ daN/m}$$

$$E_Z = 18000 \text{ daN/mm}^2$$

$$\alpha_Z = 11,0 \cdot 10^{-6} \text{ 1/}^\circ\text{C}$$

$$p_Z = G_Z/A_Z = 0,0078 \text{ daN/m,mm}^2$$

$$\bar{p}_Z = p_Z + \Delta p_Z = 0,01897 \text{ daN/m,mm}^2$$

Решение:

Од самата геометрија на столбот заклучуваме дека на релацијата „спроводник–спроводник“, критично растојание ќе биде растојанието D_{A-C} помеѓу спроводниците од фазите „А“ и „С“. Тоа изнесува:

$$D_{A-C} = \sqrt{(c-a)^2 + (e+f)^2} = 3,71 \text{ m} = 371 \text{ cm} .$$

Спроводниците ќе се отклонат од вертикалната рамнина под дејство на полниот притисок на ветрот за агол на отклон α

$$\alpha = \arctg \frac{P_V \cdot d}{G} = \arctg \frac{75 \cdot 0,0219}{0,968} = 59,5^\circ .$$

Бидејќи спроводниците од фазите „А“ и „С“, коишто се најблиску, се наоѓаат во заемно кос распон, коефициентот k што фигурира во изразите (7.1) и (7.2) ќе се пресмета на следниот начин:

$$k = 2 + \alpha / 10 = 7,95$$

па со примена на релацијата (7.5) ќе ја добиеме дозволената вредност на провесот на спроводникот f_{40} :

$$f_{40} = \left(\frac{D_{A-C} - d_S}{k} \right)^2 - L_{iz} = \left(\frac{371 - 90}{7,95} \right)^2 - 145 = 1104 \text{ cm},$$

или

$$f_{40} = 11,04 \text{ m} .$$

Понатаму, според (7.17) имаме:

$$A = \frac{3 \cdot p \cdot \sigma_M^2 \cdot (45 \cdot \alpha \cdot E - \sigma_M)}{3 \cdot p \cdot \sigma_M^2 + \bar{p}^2 \cdot E \cdot f_{40}} = \frac{-2,04063}{4,323156} = -0,472023$$

$$B = \frac{p^2 \cdot \sigma_M^2 \cdot E \cdot f_{40}}{3 \cdot p \cdot \sigma_M^2 + \bar{p}^2 \cdot E \cdot f_{40}} = \frac{80,82013}{4,323156} = 18,69471.$$

Според тоа, напрегањето σ_{40} што му одговара на дозволеениот провес f_{40} ќе биде:

$$\sigma_{40} = \frac{-A + \sqrt{A^2 + 4 \cdot B}}{2} = 4,5662,$$

и конечно, вредноста на електричниот распон на водот, според (7.20) ќе биде:

$$a_{el} = \sqrt{\frac{8 \cdot f_{40} \cdot \sigma_{40}}{p}} = 343,1 \text{ m}.$$

На сличен начин се постапува и при определувањето на електричниот распон a_{elz} . Растојанието на релацијата спроводник–заштитно јаже е најмало помеѓу заштитното јаже „Z“ и спроводникот од фазата „А“. Како што се гледа од прикажаната слика, тоа растојание на главата на столбот ќе изнесува:

$$D_{A-Z} = \sqrt{a^2 + (d + L_{iz})^2} = \sqrt{260^2 + (300 + 145)^2} = 515,4 \text{ cm} .$$

Понатаму имаме:

$$\alpha_Z = \arctg \frac{P_V \cdot d_Z}{G_Z} = 60,8^\circ ,$$

$$k_z = 2 + \alpha_z / 10 = 8,08 ,$$

$$f_{40z} = \left(\frac{D_{A-z} - d_s}{k_z} \right)^2 = \left(\frac{515 - 90}{8,08} \right)^2 = 2767 \text{ cm} = 27,67 \text{ m} ,$$

$$\sigma_{40z} = 10,848 \text{ daN/mm}^2 ,$$

и конечно:

$$a_{elz} = \sqrt{\frac{8 \cdot f_{40z} \cdot \sigma_{40z}}{p_z}} = 557,5 \text{ m} .$$

Според тоа електричниот распон на столбот тип “S” за дадените услови ќе биде:

$$a_{el} = \min \{ 343,1 ; 557,5 \} = 343,1 \text{ m} .$$

На сличен начин се пресметува големината на електричниот распон и за други вредности на избраното максимално работно напрегање σ_M и други климатски параметри. Резултатите од таквите пресметки се прикажани во следната табела.

Електричен распон [m] на столб тип „S“, производ на ЕМО–Охрид со номинален напон $U_n=110 \text{ kV}$ и спроводници MKS.N.C1.351 –Al/Ā–240/40 за максимален притисок на ветрот $P_v = 75 \text{ daN/m}^2$

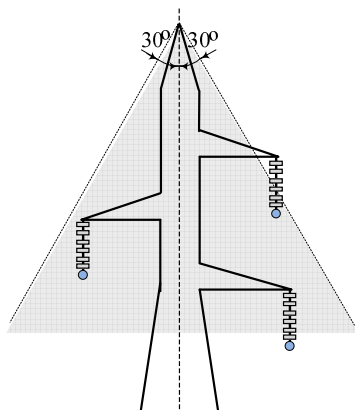
σ_M (daN/mm ²)	6,0	6,5	7,0	7,5	8,0	8,5	9,0	9,5	10,0
$k_n = 1,0$	279,6	290,9	301,9	312,6	323,1	333,4	343,1	353,5	363,3
$k_n = 1,6$	249,7	260,1	270,1	279,9	289,5	298,9	308,1	317,2	326,3
$k_n = 2,5$	218,4	227,5	236,4	245,0	253,4	261,7	269,9	277,9	285,9
$k_n = 4,0$	184,8	192,5	200,0	207,3	214,5	221,4	228,3	235,1	241,8



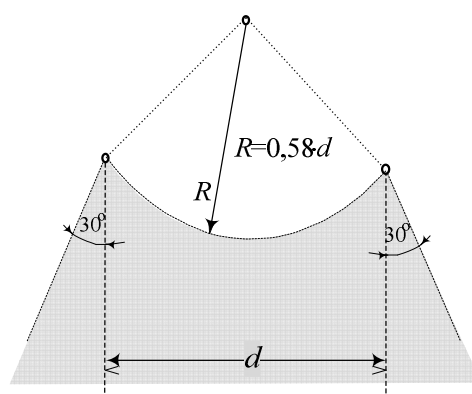
7.4 ЗАШТИТНА ЗОНА

Многу често, над фазните спроводници кај високонапонските надземни водови се поставуваат заштитни (земјоводни) јажиња. Заштитните јажиња се секогаш **заземјени** и се поставуваат над спроводниците со цел ги примат врз себе евентуалните удари на молњата, а струјата на атмосферското празнење да ја одведат во земјата. На тој начин, тие ги штитат водовите од атмосферски пренапони, бидејќи директните празнења на молњата во фазните спроводници скоро секогаш предизвикуваат **повратни прескоци**, така што покрај оштетувањата што притоа можат да настанат, тоа скоро редовно доведува и до појава на **куса врска** на местото на ударот.

Според нашиот Правилник [1], **заштитна зона** е дел од просторот под заштитното јаже (јажиња) во кој се смета дека спроводниците се **доволно заштитени** од директните удари на молњата. Спроводниците, притоа, треба да се наоѓаат во заштитната зона во сите распони од водот и на сите температури од 0 до 40°C во услови без ветер. Според истиот Правилник, заштитната зона за водови со едно заштитно јаже дефинирана на сликата 7.3 а. Таа го опфаќа просторот во границите на аголот од најмногу 30° од обете страни на заштитното јаже, мерено во однос на вертикалата. За водовите со две заштитни јажиња, заштитната зона е дефинирана на сликата 7.3 б.



Слика 7.3.а



Слика 7.3.б

Од горе изложеното произлегува дека сигурноста на **заштитата** на фазните спроводници од директните удари на гром **не е стопроцентна**, но е сепак доволно висока. Веројатноста громот да ја помине (т.е. пробие) заштитата и да дојде до удар во некој од фазните спроводници во најголема мера зависи од заштитниот агол α под кој што заштитното јаже ги штити фазните спроводници, но зависи и од височината на поставување на јаже H_{ZJ} , односно од височината на столбот до неговиот врв $H_{ST} = H_{ZJ}$. Лабораториските испитувања вршени на модели како и анализата на експлоатационите податоци [5] ја даваат следната емпириска релација помеѓу веројатноста $P\%$, изразена во проценти, громот да помине низ заштитата и да удри во некој од фазните спроводници, заштитниот агол α и височината H_{ST} :

$$P\% = 0,01 \cdot e^{\frac{\alpha \cdot \sqrt{H_{ST}}}{39,1}}, \% \quad (7.24)$$

Во изразот (7.24) заштитниот агол α се изразува во степени ($^\circ$), височината H_{ST} се изразува во m, додека веројатноста $P\%$ се добива во %.

Врз основа на релацијата (7.24) се добива табелата 7.2 во која се прикажани процентуалните вредности на веројатноста P во зависност од заштитниот агол α и височината H_{ST} .

Табела 7.2 Зависност на веројатноста $P\%$ на директен удар на громот во фазните спроводници од заштитниот агол α и височината на столбот H_S

α ($^\circ$)	10	15	20	25	30	35	40	45
$H_{ST} = 10$ m	0,031	0,056	0,099	0,175	0,309	0,548	0,970	1,719
$H_{ST} = 20$ m	0,041	0,082	0,165	0,332	0,669	1,345	2,713	5,466
$H_{ST} = 30$ m	0,050	0,113	0,254	0,570	1,281	2,875	6,456	14,494

Како што се гледа од табелата 7.2, сигурноста од директен удар на громот во фазните спроводници може да се намали со намалување на заштитниот агол α , но таа може да се намали и со зголемување на бројот на заштитните јажиња на водот. Тоа секако би го поскапило водот и како мерка ќе биде оправдана само кај поважните водови што минуваат низ региони со зголемена интензивност на атмосферските празнења. Затоа, во другите земји, надземните водови со номинален напон 330 kV и повеќе најчесто се изведуваат со помал заштитен агол од 30° , а неговата вредност обично се движи во интервалот од 15° до 25° .

7.5 СИГУРНОСНИ ВИСОЧИНИ И СИГУРНОСНИ ОДДАЛЕЧЕНОСТИ

Покрај сигурносното растојание d_s , нашите прописи разликуваат уште две други величини: сигурносна височина H_S и сигурносна оддалеченост D_S .

Сигурносната височина H_S претставува најмала дозволена вертикална оддалеченост на спроводниците односно деловите под напон, од земјата или од некој друг објект на неа, при температура $+40^\circ\text{C}$ (исклучително се препорачува при $+60^\circ\text{C}$), односно при температура $-5^\circ\text{C} + \text{НЗДТ}$, без ветар. *Сигурносната оддалеченост D_S* , пак, претставува најмала дозволена оддалеченост на спроводник односно делови под напон, од земјата или од некој друг објект во кој и да е правец. Таа се однесува на состојбата при температура од $+40^\circ\text{C}$ (исклучително се препорачува при $+60^\circ\text{C}$) и при истовремено дејствување на ветрот од нула до неговата полна брзина.

Сигурносните височини се меродавни, пред сè, за определување на основните височини на столбовите. Во табелата 7.3 се прикажани некои поважни вредности на сигурносните височини H_S и сигурносните оддалечености D_S , изразени во m.

Во поедините случаи на премини, од сигурносни причини е предвидено и определено смалување на нормалното дозволено напрегање σ_{nd} . Во третата колона од табелата 7.3 приложени се пропишаните вредности (изразени во % од σ_{nd} према табелата 2.6) на нормалното дозволено напрегање во овие случаи. Од истите причини, во некои случаи се предвидуваат и електричко (Е), механичко (М), или пак истовремено електричко и механичко (ЕМ) појачување на изолацијата на водот.

Вредностите дадени во табелата 7.3 се однесуваат на високонапонските надземни водови со номинален напон до 110 kV. За водовите со повисок номинален напон, тие треба да се зголемат за следните износи:

- за 0,75 m, кај водовите со номинален напон $U_n = 220 \text{ kV}$,
- за 2,00 m, кај водовите со номинален напон $U_n = 380 \text{ kV}$.

Сигурносните височини и сигурносните оддалечености дефинирани на начинот како што е тоа направено во нашите прописи, претставуваат емпириски вредности кои според досегашната пракса дале задоволителна сигурност на погонот за временските услови што се вообичаени за нашата земја. Сигурносните височини и сигурносните оддалечености, прикажани во табелата 7.3, се однесуваат на температурата на спроводниците од $+40^\circ\text{C}$. Меѓутоа, за водовите со зголемено струјно оптоварување, се препорачува контролата на височините и оддалеченостите на спроводниците од објектите на земјата да се спроведува за температура од 60°C .

Табела 7.3. Сигурносни височини и сигурносни оддалечености за некои случаи на премин и приближување на високонапонските водови со номинален напон $U_n \leq 110 \text{ kV}$ до разни објекти

Објект на премин односно приближување	Сигурносна височина H_S (m)	Сигурносна оддалеченост D_S (m)	% смалување на норм. дозв. напрегање	Појачување на изолацијата
Недостапни места	4	3	/	/
Места недостапни со возило	5	4	/	/
Места достапни за возило	6	5	/	/
Недостапни делови од градби	3	3	/	ЕМ
Достапни делови од градби	5	4	/	ЕМ
Градби со запаллив покрив	12	5	/	ЕМ
Населени места	7	7	/	Е
Спортски игралишта	12	12	/	ЕМ
Густо населени места	7	/	75 %	ЕМ
Магистрални патишта	7	/	/	ЕМ
Локални и регионални патишта	7	/	/	Е
Автопати	7	/	75 %	ЕМ
Неелектрифицирани железници	7	/	85 %	ЕМ
Електрифицирани железници	12	/	85 %	ЕМ
Мостови	5	5	/	/
Пловни реки и канали	15	10	/	ЕМ
Шуми и дрвја	3	3	/	/

7.6 ПРЕМИНУВАЊЕ НА НАДЗЕМНИТЕ ВОДОВИ И НИВНО ПРИБЛИЖУВАЊЕ КОН РАЗНИ ОБЈЕКТИ

Правилникот [1] детално ги дефинира и условите што треба да бидат исполнети и мерките што треба да се преземат при преминувањето на надземните водови преку разни објекти, со цел да се зголеми сигурноста било на водот, било на објектот преку кој се преминува. Според Правилникот, во поедините случаи што можат да настанат треба да се применуваат следните мерки:

- а) потполна **забрана** на преминот;
- б) да бидат запазени определени **сигурносни височини** и **сигурносни растојанија** во нормални прилики;
- в) да биде запазена **минималната височина** и во случајот на нерамномерно отпаѓање на зимскиот додатен товар;
- г) да се применува **засилена електрична сигурност** на изолацијата како и **заштита** на самите изолатори од електричен прескок;
- д) да се применува **засилена механичка сигурност** на изолацијата;
- ѓ) да се применува **смалено работно напрегање** на спроводниците и заштитните јажиња;
- е) да се врши пресметка и **проверка на напрегањето** во спроводниците и јажињата во точките на зацврстување (обесување) во услови на постоење на ИЗДТ;

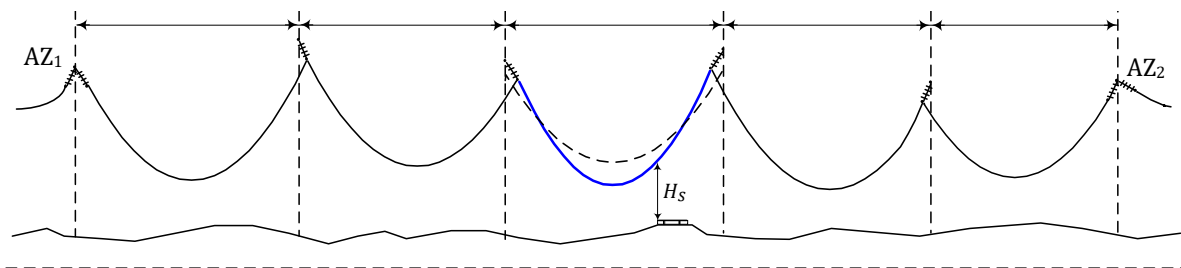
- ж) да се почитува ограничувањето во поглед на **минималните пресеци** за спроводниците и забраната за употреба на жици;
- з) да се применува **ограничување на аголот** на премин;
- с) да се почитува **забраната за наставување** на спроводниците и заштитните јажиња при премини над некои пресечни објекти;
- и) во определени случаи да се **исклучи примената на исконувачки стегалки** за спроводниците;
- ј) да се почитува ограничувањето во врска со **дозвоениот број на носечки столбови** во преодните полиња;
- к) да се почитува ограничувањето на **употребата на дрвени столбови** како и потребите од зголемена сигурност кај затезните столбови во определени случаи.

а) Потполна забрана на преминот на надземен вод со прописите се бара само во исклучителни случаи како што се: премини над објекти во кои се наоѓа лесно запалив материјал, премини над стрелишта, скијачки скокалници, антени на предајни и приемни РТВ уреди, аеродроми и друго. Понекогаш, се препорачува, определени премини на надземниот вод над некои објекти по можност само да се избегнуваат (премини над згради што служат како стални живеалишта, спортски игралишта, гробишта и друго).

б) Покрај сигурносното растојание d_s , нашите прописи разликуваат уште две други величини: **сигурносна височина H_s** и **сигурносна оддалеченост D_s** . За нив веќе стана збор во точката 7.5.

в) Во некои случаи, од безбедносни причини, со прописите се бара при преминување на надземен вод со висечки изолатори над некои објекти на земјата (згради, железнички пруги и друго) да биде зачувана некоја **минимална сигурносна височина и во случајот кога нафатениот зимски додатен товар ќе остане само во преодниот распон а ќе отпадне во сите останати распони. Во тој случај доаѓа до зголемување на провесот на нерамномерно оптоварениот спроводник во преодниот распон (слика 7.4), па затоа со прописите во споменатиот случај се предвидува **обврзна контрола** на сигурносните височини над пресечниот објект.**

За решавање на наведениот случај, во стручната литература се среќаваат разни постапки кои се чисто графички, графоаналитички или пак се чисто аналитички. Кај нас, одомаќена е аналитичката постапка на Wicisk [2], макар што таа не се смета за сосема точна.



Слика 7.4. Контрола на сигурносната височина во преоден распон над железничка пруга при нерамномерно оптоварен спроводник со зимски додатен товар

з), д) Од сигурносни причини, со Правилникот [1] се предвидува, во определени случаи на премини на надземниот вод над некои објекти на земјата да се **смали ризикот од**

пробив и оштетување на електричната изолација, бидејќи тоа најчесто предизвикува појава на куса врска со што се создава можност да дојде до прекин и паѓање на спроводникот на земјата. Смалувањето на ризикот се постигнува на неколку начини: со **електрично засилување** на изолацијата (Е), со **механичко засилување** на изолацијата (М) или пак со истовремено електричко и механичко засилување на изолацијата (ЕМ), како и со примена на заштитни рогови и прстени со чија помош настанатиот електричен лак се оддалечува од изолаторот така што тој нема да биде оштетен од создадената висока температура.

г) Од сигурносни причини со Правилникот исто така се предвидува, во одделни случаи на преминување на водот над некои преодни објекти (градски улици, трамвајски и тролејбуски водови, пловни реки и канали, ТК-водови, спортски игралишта, железнички пруги и друго), преодното затезно поле да се изведе со **смалено работно напрегање**, со цел веројатноста за прекин на спроводниците во преодното затезно поле да се сведе на што е можно помала мерка. Смалувањето на напрегањето се однесува не само на нормалното дозволено напрегање σ_{nd} туку во исто време и на исклучителното дозволено напрегање σ_{id} .

е) Како што беше изнесено во точката 7.1.3, со Правилникот [1] се предвидува исклучителниот зимски додатен товар да биде најмалку двојно поголем од нормалниот зимски додатен товар. Меѓутоа, во определени специфични случаи, при премин на надземен вод над важни ТК-водови како и при премин на водот над железничка пруга во состав на МКЖ, заради зголемена сигурност, со прописите се захтева меѓу другото и да се изврши **проверка на напрегањето во точките на обесување** на спроводниците и јажињата во преодниот распон во услови на постоење на исклучителен зимски додатен товар кој е најмалку три пати поголем од нормалниот зимски додатен товар.

ж) Членовите 168 и 197 од Правилникот [1] ги дефинираат најмалите **дозволен пресеци** на спроводниците и заштитните јажиња што смеат да бидат употребени во преодното поле доколку во него постои вкрстосување на водот со ТК-вод односно со неелектрифицирана железничка пруга. Со тоа повторно се тежи да се зголеми сигурноста и безбедноста на преминот. Од истите причини, со Правилникот се предвидува и забрана на употребата на жици како спроводници на надземниот вод при премин на водот над автопат, пат од прв ред, жичарница, железничка пруга, пловна река и канал и друго.

з) За да се обезбеди што е можно помал дел од вкрстосувачкиот објект да има над себе надземен вод (улица, трамвајска пруга, железничка пруга, ТК-вод и друго), прописите вршат **ограничување на аглите на премин** (од долната страна). Инаку, по правило овие агли треба да бидат што е можно поблиску до 90°.

с), и). Од сигурносни причини, со цел да се зголеми сигурноста на преминот над некои поважни вкрстосувачки објекти (спортски игралишта, автопати, градски улици, ТК-водови, жичарници, железнички пруги, пловни реки и канали и друго), Правилникот [1] воведува **забрана на употребата на наставки** на спроводниците и заштитните јажиња во преодниот распон. Тоа значи дека во споменатите случаи, спроводниците и јажињата во преодниот распон мора да бидат изведени од еден дел, односно тие не смеат да се продолжуваат со наставки. Исто така, од веќе споменатите безбедносни причини, при премин на надземен вод над ТК-вод и железничка пруга, прописите забрануваат употреба на искокнувачки и лизгачки стегалки за спроводниците. Тоа е

сосема разбирливо бидејќи доколку таквите стегалки попуштат под дејство на оптоварувањето, спроводникот кој е нормално под напон, ќе дојде во допир со штитениот објект, а тоа може да предизвика несреќа и големи материјални штети.

Деталите во врска со сите постојни прописи и ограничувања што се однесуваат на премините на надземните водови над разни пресечни објекти се дадени во [Правилникот \[1\]](#), па затоа во натамошниот дел од текстот тие повеќе нема да се разгледуваат.



Пример 7.3. За столбот тип „S“, производ на ЕМО–Охрид, чии што димензии и диспозиција на главата се прикажани во претходниот пример 7.2, да се пресметаат вредностите на дозволените (конструктивните) агли на отклон за кои ќе бидат задоволени одредбите од Правилникот во поглед на сигурносните растојанија.

Решение:

Според членот 29 од Правилникот, оддалеченоста на деловите под напон (спроводниците, заштитната арматура) од заземјените делови на столбот (конзоли, тело на столбот) мора да биде поголема од соодветното сигурносно растојание d_s . Оваа оддалеченост треба да се контролира за следните три случаи:

1. случај на неотклонет изолаторски синцир, кога сигурносното растојание кај водовите со номинален напон 110 kV изнесува $d_{s1} = 90$ cm, (види табела 7.1);
2. случај на отклонет изолаторски синцир под дејство на ветар со притисок $P'_V = 0,15 \cdot P_{\max}$, кога сигурносното растојание изнесува $d_{s2} = 80$ cm;
3. случај на отклонет изолаторски синцир под дејство на ветар со својот полн притисок $P_V = P_{\max}$, кога сигурносното растојание изнесува $d_{s3} = 30$ cm.

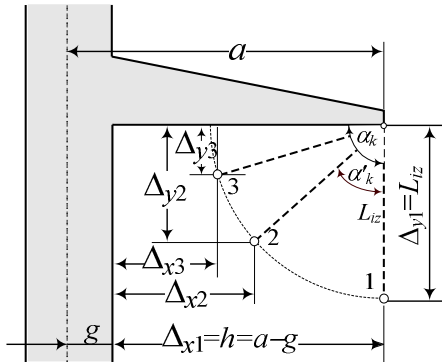
На прикажаната слика, во размер е нацртан дел од разгледуваниот столб, заедно со горната конзола, изолаторскиот синцир и спроводникот. Изолаторскиот синцир и спроводникот се прикажани во три различни состојби, нумерирани со броевите „1“, „2“ и „3“, кои соодветствуваат на погоре споменатите три случаи, предвидени со Правилникот. На истата слика се прикажани и соодветно означени, сите потребни величини, заедно со нивните бројни вредности.

За случајот на неотклонет изолаторски синцир ($\alpha = 0$), како што е видно од самата геометрија на столбот, растојанието на спроводникот до конструкцијата на столбот, мерено во правец на X–оската ќе биде $\Delta_{x1} = h = a - g = 200$ cm $> d_{s1}$. Во правец на Y–оската, пак, растојанието на спроводникот до долниот раб од конзолата ќе биде $\Delta_{y1} = L_{iz} = 145$ cm $> d_{s1}$. Значи и во обата правца растојанијата Δ_{x1} и Δ_{y1} се поголеми од пропишаното сигурносно растојание $d_{s1} = 90$ cm, што е во согласност со Правилникот.

Од сликата исто така се гледа дека во случајот на отклонет изолаторски синцир под дејство на ветрот со притисок $P'_V = 0,15 \cdot P_{\max}$, критичното приближување на спроводникот до конструкцијата на столбот е до самото тело на столбот. Тоа треба да е поголемо од од пропишаното растојание $d_{s2} = 80$ cm.

И конечно, од сликата се гледа дека критичното приближување на спроводникот до конструкцијата на столбот во случајот број „3“ е до горната конзола.

Во согласност со напред реченото, вредноста на аголот на отклон α'_k за кој што во случајот „2“ (кога е $P_V = 0,15 \cdot P_{\max}$) критичната оддалеченост ја достигнува дозволената вредност $d_{s2} = 80$ cm, според сликата, се добива со помош на следната релацијата:



$$\begin{aligned}
 a &= 260 \text{ cm,} \\
 h &= a - g = 260 - 60 = 200 \text{ cm,} \\
 L_{iz} &= 145 \text{ cm,} \\
 d_{s1} &= 90 \text{ cm; } d_{s2} = 80 \text{ cm; } d_{s3} = 30 \text{ cm,} \\
 \Delta_{x1} &= h = a - g = 200 \text{ cm,} \\
 \Delta_{y1} &= L_{iz} = 145 \text{ cm} > d_{s1}, \\
 \Delta_{x2} &= d_{s2} = 80 \text{ cm, } \Delta_{y2} = 81,3 \text{ cm} > d_{s2}, \\
 \Delta_{x3} &= 58 \text{ cm} > d_{s2}, \Delta_{y3} = d_{s3} = 30 \text{ cm,}
 \end{aligned}$$

$$\Delta_{x2} \equiv d_{s2} = h - L_{iz} \cdot \sin \alpha'_k,$$

од каде што следува:

$$\alpha'_k = \arcsin \frac{h - d_{s2}}{L_{iz}} = \arcsin \frac{200 - 80}{145} = 55,9^\circ$$

$$\alpha'_k = \arcsin (h - d_{s2}) / L_{iz} = \arcsin (200 - 80) / 145 = 55,9^\circ.$$

Растојанието помеѓу спроводникот и горната конзола од столбот во овој случај ќе биде:

$$\Delta_{y2} = L_{iz} \cdot \cos \alpha'_k = 145 \cdot \cos 55,9^\circ = 81,3 \text{ cm} > 80 \text{ cm}.$$

Според тоа, критичниот агол α'_k којшто се однесува на состојбата „2“ ($P_V = 0,15 \cdot P_{\max}$) ќе биде:

$$\alpha'_k = 55,9^\circ.$$

Во третиот случај, критичното приближување на спроводникот до конструкцијата на столбот ќе биде во вертикалниот правец, до долниот дел од конзолата. Според тоа, максималниот агол на отклон α_k за кој што ќе се достигне сигурносната оддалеченост $d_{s3} = 30$ cm, пропишана со Правилникот во случајот на отклон на изолаторскиот синџир кога ветрот делува со својот полн притисок ($P_V = P_{\max}$), ќе се добие со помош на следната релација:

$$\Delta_{y3} \equiv d_{s3} = L_{iz} \cdot \cos \alpha_k,$$

од каде што се добива:

$$\alpha_k = \arccos \frac{d_{s3}}{L_{iz}} = \arccos \frac{30}{145} = 78,1^\circ.$$

Хоризонталното растојание Δ_{x3} помеѓу спроводникот и телото на столбот во овој случај ќе биде:

$$\Delta_{x3} = h - L_{iz} \cdot \sin \alpha_k,$$

$$\Delta_{x3} = 200 - 145 \cdot \sin 78,1^\circ = 58,1 \text{ cm} > 30 \text{ cm}.$$

Според тоа, критичниот агол α_k којшто се однесува на состојбата „3“ ($P_V = P_{\max}$) ќе биде: $\alpha_k = 78,1^\circ$.



Пример 7.4. За примерот анализиран во претходната задача да се пресметаат конструктивните агли на отклон α_k и α'_k и за случајот кога се работи за електрички појачана изолација (ENP), кога изолаторските синцири имаат должина $L_{iz} = 180$ cm.

Решение:

Во овој случај ќе имаме:

Случај „2“ ($P_V = 0,15 \cdot P_{max}$):

$$\alpha'_k = \arcsin (h - d_{s2}) / L_{iz} = \arcsin (200 - 80) / 180 = 41,8^\circ .$$

Растојанието помеѓу спроводникот и горната конзола од столбот во овој случај ќе биде:

$$\Delta_{y2} = L_{iz} \cdot \cos \alpha'_k = 180 \cdot \cos 41,8^\circ = 134 \text{ cm} > 80 \text{ cm} .$$

Според тоа, критичниот агол α'_k којшто се однесува на состојбата „2“ ($P_V = 0,15 \cdot P_{max}$) ќе биде:

$$\alpha'_k = 41,8^\circ .$$

Случај „3“ ($P_V = P_{max}$):

Лесно можеме да се убедиме дека во овој случај конструктивниот агол α_k ќе биде дефиниран со хоризонталното приближување и ќе се пресметува слично како и во претходниот случај:

$$\Delta_{x3} \equiv d_{s3} = h - L_{iz} \cdot \sin \alpha_k ,$$

$$\alpha_k = \arcsin \frac{h - d_{s3}}{L_{iz}} = \arcsin \frac{200 - 30}{180} = 70,81^\circ$$

За овој агол вертикалното растојание Δ_{y3} на спроводникот до долниот раб од конзолата ќе биде:

$$\Delta_{y3} = L_{iz} \cdot \cos \alpha_k = 180 \cos 70,81 = 59,2 \text{ cm} .$$

Според тоа, критичниот агол α_k којшто се однесува на состојбата „3“ ($P_V = P_{max}$) ќе биде:

$$\alpha_k = 70,81^\circ .$$



Аглите α'_k и α_k се нарекуваат *конструктивни агли на отклон*, и како што е видно од примеров, тие зависат од должината на изолаторскиот синцир L_{iz} и димензиите на главата на столбот, т.е. зависат исклучиво од геометријата на проблемот.

Посматрано од аспект на задоволување на одредбите на членот 29 од Правилникот во поглед на сигурносните растојанија во отклонета состојба на спроводниците, *аголот на отклон α' на спроводниците под дејство на ветрот со притисок $P'_V = 0,15 \cdot P_{max}$ не смее да биде поголем од конструктивниот агол на отклон α'_k* . Слично на тоа, аголот на отклон α на спроводниците под дејство на ветрот со својот полн притисок $P'_V = P_{max}$ не смее да биде поголем од конструктивниот агол на отклон α_k . Со помош на конструктивните агли α'_k и α_k , значи, може да се врши контрола на отклонот на изолаторските синцири под дејство на ветрот на сосема едноставен начин.

Вистинските агли на отклон α' и α на спроводниците (и изолаторските синцири) под дејството на ветрот во случаите „2“ и „3“ ќе зависат од многу фактори, меѓу кои најважните се:

притисокот на ветрот P_V ,

пречникот d и единичната тежина на спроводниците G ,
тежината на изолаторскиот синцир G_{iz} ,
конфигурацијата на теренот, големините на поедините распони на водот
и друго.

Нивното пресметување е детално прикажано во збирката задачи.

Во случајот кога за изолаторските синцири е предвидена примена на заштитна
арматура (заштитни рогови и прстени), конструктивните агли на отклон α'_k и α_k се
определуваат на сличен начин, но по графички пат, водејќи сметка и за елементите на
заштитната арматура.

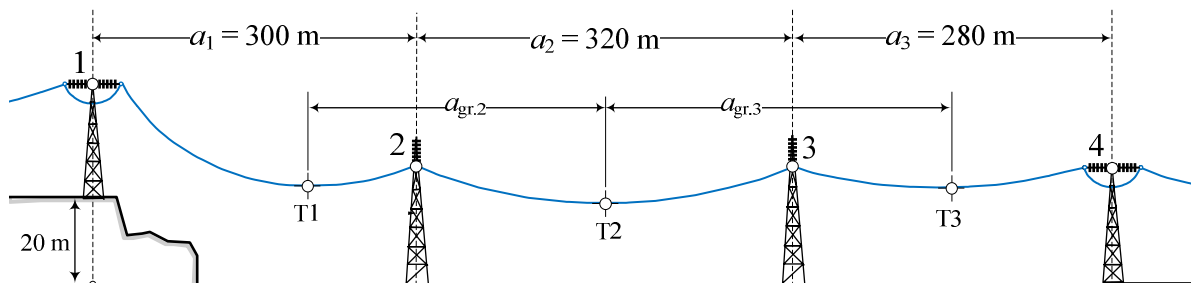
□ □ □

Пример 7.5. На сликата е прикажано затезно поле од еден 110 kV далекувод, составено
од три распони: $a_1 = 300$ m, $a_2 = 320$ m и $a_3 = 280$ m. Идеалниот распон на затезното
поле изнесува $a_i = 330,33$ m. Напрегањето на спроводниците при максималната темпе-
ратура изнесува $\sigma_{40} = 3,67$ daN/m, mm². Параметарот на синцирницата притоа изнесува
 $c_{40} = \sigma_{40}/p = 1071$ m. Во следната табела се дадени координатите (x_i, y_i) на точките на
обесување на спроводниците при одделните столбови.

	Точка „1“	Точка „2“	Точка „3“	Точка „4“
x (m)	0	300	620	900
y (m)	36	20	20	18

Водот е изведен со спроводници Al/Ѕ 240/40 mm², параметри: $A = 282,5$ mm²; $G =$
0,968 daN/m; $d = 21,9$ mm. Должината на носечките изолаторски синцири изнесува $L_{iz} =$
1,8 m а тежината $G_{iz} = 58,4$ m. Водот е изграден за следните услови: максимално
работно напрегање $\sigma_M = 9$ daN/mm², фактор на НЗДТ $k_n = 1,6$, притисок на ветрот $P_V =$
75 daN/m². Потребно е:

- да се пресмета гравитациониот распон a_{gr} на столбот бр. 2 при температура $\theta = 40^\circ\text{C}$;
- колкав е аголот на отклон α_2 на изолаторите при столбот бр. 2 под дејство на ветрот
кој дејствува со својот полн притисок, при температура $\theta = 40^\circ\text{C}$;



Слика П.7.5.1. Графички приказ на анализираното затезно поле

Решение:

а) Пресметка на гравитациониот распон $a_{gr.2}$ при столбот бр. 2

Гравитационен распон на некој столб a_{gr} се дефинира како хоризонтално растојание помеѓу темињата на синџирните од јажето во соседните два распона.

Среден распон на некој столб a_{sr} се дефинира како полузбир од должините на двата сосени распона.

Во согласност со резултатот добиен во Примерот 4.5, за гравитациониот распон на столбот бр. 2 ќе имаме:

$$a_{gr.2} = \frac{a_1 + a_2}{2} + c_{40} \cdot \left(\frac{\Delta h_1}{a_1} - \frac{\Delta h_2}{a_2} \right) = \frac{300 + 320}{2} + 1071,1 \cdot \left(\frac{-16}{300} - \frac{0}{320} \right) = 252,9 \text{ m.}$$

Гравитациониот распон ќе ни послужи за пресметување на вертикалната сила $F_G = G \cdot a_{gr.2}$ со која фазниот спроводник, под дејство на земјината тежа, дејствува врз изолаторскиот синџир во точката на обесување „2“.

б) Пресметка на аголот на отклон на изолаторите при столбот бр. 2

Аголот на отклон α на носечките изолаторски вериги кај некој столб под дејство на ветрот се добива врз основа на постапката опишана во Примерот 3.1 од Збирката задачи.. Врз точката на обесување „2“ во тој случај дејствуваат неколку сили, и тоа:

1) силата на ветрот F_V врз спроводниците која што се добива како производ:

$$F_V = P_V \cdot d \cdot a_{sr.2} = P_V \cdot d \cdot \frac{a_1 + a_2}{2} = 75 \cdot 21,9 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{300 + 320}{2} = 509,2 \text{ daN};$$

2) силата на сопствената тежина на самиот фазен спроводник F_G :

$$F_G = G \cdot a_{gr.2} = G \cdot \left[\frac{a_1 + a_2}{2} + c_{40} \cdot \left(\frac{\Delta h_1}{a_1} - \frac{\Delta h_2}{a_2} \right) \right] = 0,968 \cdot 252,9 = 245 \text{ daN};$$

3) половина од силата F_{iz} со која ветрот дејствува врз изолаторскиот синџир:

$$F_{iz} = P_V \cdot S_{iz} = P_V \cdot (L_{iz} \cdot D_{iz}) = 75 \cdot 1,8 \cdot 0,1 = 13,5 \text{ daN};$$

4) половина од силата $G_{iz} = 58,4 \text{ daN}$ на тежината на изолаторскиот синџир.

Според тоа, за аголот на отклон на изолаторскиот синџир кај столбот бр. „2“ при 40°C , кога ветрот дејствува со својот полн притисок, ќе добиеме:

$$\alpha_2 = \arctg \frac{P_V \cdot d \cdot a_{sr.2} + 0,5 \cdot F_{iz}}{G \cdot a_{gr.2} + 0,5 \cdot G_{iz}} = \arctg \frac{509,2 + 13,5 / 2}{245 + 58,4 / 2} = 62^\circ.$$



8 ЗАЗЕМЈУВАЧИ НА СТОЛБОВИТЕ ОД ДАЛЕКУВОДИТЕ

8.1 ВОВЕД

Општо речено, *заземјувач* е множество од неизолирани и меѓусебно галвански поврзани спроводници (хоризонтални и вертикални) кои се наоѓаат во добар контакт со земјата и кои имаат првенствена задача струјата на земјоспој, која се нарекува и “струја на грешка”, да ја спроведат во земјата така што на површината од земјата да не се јават напони кои ќе го загорат животот на луѓето и животните што можат да се најдат во непосредната околина на заземјувачот. Покрај тоа, заземјувачот треба да има што е можно помала преодна отпорност према земјата, која уште се нарекува „отпорност на распространување” за да се обезбеди струјата на грешката да задржи доволно висока вредност заради дејствување на соодветната релејна заштита, ако е таа предвидена.

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 низ 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.

Густијата 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.

Основна задача на заземјувачите е тие да создадат пат на струјата на грешка во земјата со што е можен помала преодна отпорност и со тоа да ги елиминираат или во што е можно поголема мерка да ги ублажат опасностите поради настанатите превисоки потенцијали во околината на местото на грешката.

Елементите на заземјувачот (кои често се нарекуваат и електроди) се најчесто:

- метални ленти или јажиња;
- челични цевки;
- метални плочи;
- разни метални творби (водоводи, цевководи, топловоди, метални конструкции на индустриските градби и машини) кои се наоѓаат закопани во земјата;
- разни метални творби (водоводи, цевководи, топловоди, метални конструкции на индустриските градби и машини) кои се наоѓаат закопани во земјата;
- армиранобетонските темели на градбите;
- темелите на столбовите од далекуводите;

- друго.

Како елементи од заземјувачите многу често се користат и **неизолираните метални плаштови** на енергетските кабли.

При одведувањето на струјата I_Z во земја заземјувачот добива некој потенцијал U_Z , којшто е пропорционален на струјата на одведување I_Z . Односот

$$\frac{U_Z}{I_Z} = R$$

се нарекува **отпорност на распростирање** на заземјувачот. Отпорноста на распростирање R не зависи од струјата на одведување I_Z , туку **зависи од димензиите и геометријата** на самиот заземјувач, како и од **карактеристиките на тлото** во кое што тој се наоѓа.

Површината на земјата во зоната на одведувањето на струјата I_Z добива во разни точки **разни потенцијали** (слика 8.1). Распределбата на потенцијалите по површината од земјата зависи исто така од геометријата на заземјувачот т.е. од неговите димензии, длабочината на закопувањето на неговите елементи и слично. Значи, при одведувањето на струјата во земја, помеѓу површината на земјата и заземјените предмети кои се наоѓаат на потенцијал U , се јавува некоја потенцијална разлика која во различни точки на површината на земјата е различна.

Максималната разлика на потенцијали што човек кој се наоѓа во непосредна близина на заземјувачот може да ја премости се нарекува **потенцијална разлика на допир** ΔE_d . Таа уште се **нарекува напон пред допирот** и е секогаш поголема од напонот ΔU_d на кој ќе биде изложено телото од човекот којшто ја премостил таа потенцијална разлика, т.е. $\Delta E_d > \Delta U_d$. Тој напон се нарекува **напон на допир** заради падот на напон на човековите стопала. Притоа е

$$\Delta U_d = \frac{\Delta E_d}{k_d}; \quad k_d > 1. \quad (\text{тука фали слика со човече и дефиниции за } \Delta E_d \text{ и } \Delta U_d)$$

Човек којшто се наоѓа во близина на заземјувачот што одведува струја во земја, може да се најде во опасност и не допирајќи ги заземјените предмети, доколку чекорејќи биде изложен на напон. **Потенцијалната разлика на чекор** ΔE_c е разлика на потенцијалите помеѓу оние две соседни точки на површината на земјата кои што се наоѓаат на меѓусебно растојание од 1 m и помеѓу кои постои најголема потенцијална разлика. Слично како и во претходниот случај, и овде напонот ΔU_c на којшто ќе биде изложено телото од човекот кој чекорејќи ја премостил потенцијалната разлика ΔE_c , заради падот на напон на човековите стопала, ќе биде помала од неа, т.е. $\Delta E_c > \Delta U_c$. Притоа е:

$$\Delta U_c = \frac{\Delta E_c}{k_c}; \quad k_c > 1. \quad (\text{тука фали слика со човече и дефиниции за } \Delta E_c \text{ и } \Delta U_c)$$

Основни параметри на секој заземјувач се:

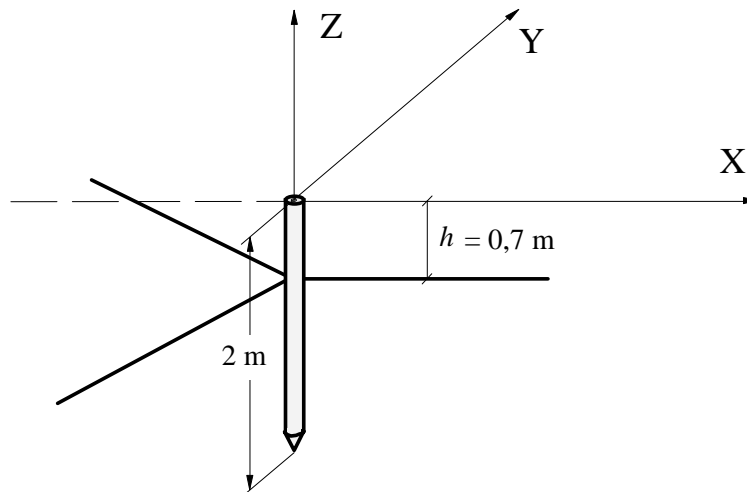
- отпорноста на распростирање R ;
- потенцијалната разлика на чекор ΔE_c и
- потенцијалната разлика на допир ΔE_d .

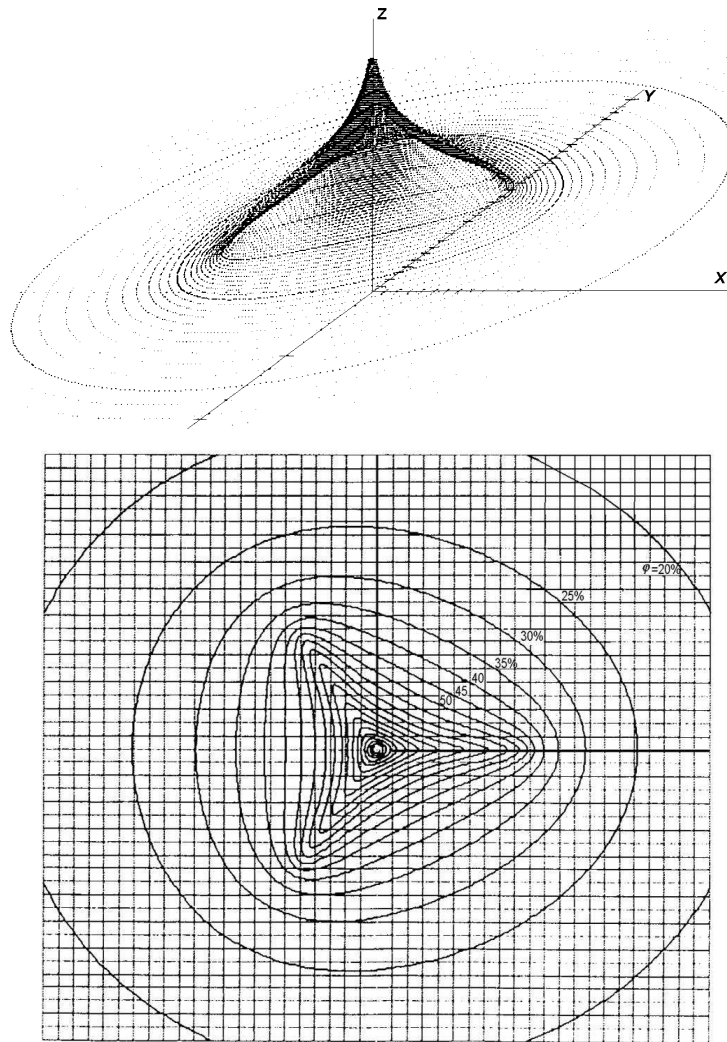
Тие зависат од карактеристиките на почвата (нејзината структура, специфичната отпорност и друго) и од геометријата на самиот заземјувач.

Основна задача при проектирањето и димензионирањето на заземјувачите е при однапред познати струја на одведување I_z , специфична отпорност на тлото ρ и времетраење на струјата на грешка, да се избере заземјувач кој ќе ги задоволи техничките ограничувања дефинирани со **мерките за безопасност**, но и да биде **економичен**. Значи, изборот и димензионирањето на заземјувачите претставува сложена **техничко-економска задача**, при што основен проблем е решавањето на самиот заземјувач.

Под терминот **решавање на заземјувач** се подразбира определување на отпорноста на распростирање R т.е. определување на потенцијалот U_z на кој доаѓаат заземјувачот и заземјените метални делови како и определување на распределбата на потенцијалите по површината на земјата во негова непосредна близина, а во тој контекст и определување потенцијалните разлики на чекор и допир ΔE_c и ΔE_d .

За решавањето на овој проблем се развиени математички модели со кои е овозможено **по пресметковен пат** да се добијат резултати со многу висока точност. Постојат повеќе **нумерички постапки** и **емпириски изрази** кои служат за приближно пресметување на карактеристиките на заземјувачите. Но постојат и пософистицирани, компјутерски ориентирани, постапки и методи (потенцијалниот методот, методот на средни потенцијали, методот на парцијални површини и др.) кои се базираат на **теоријата на полето** и ја користат формалната аналогија помеѓу електростатичкото и стационарното струјно поле. Сите овие методи даваат резултати со определена точност и во зависност од специфичноста на проблемот се користи еден или друг метод. За поголема точност и попрецизна слика пресметките треба да ги вршиме со некој од нумеричките методи.





Слика 8.1 Зракаст заземјувач составен од три ленти, изглед на потенцијалната инка и еквипотенцијалните линии

8.2 ОПШТО ЗА ЗАЗЕМЈУВАЧИТЕ НА ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТСКИТЕ ОБЈЕКТИ

8.2.1 Карактеристики на тлото и негово влијание врз карактеристиките на заземјувачите

Специфичната отпорност на тлото

Кај повеќето видови заземјувачи се поставуваат доста **строги барања** во поглед на големината на потенцијалот U_z и потенцијалните разлики ΔE_d и ΔE_c што тие го добиваат во режимот на одведување на струјата на грешката, така што е неопходно пресметката на неговата отпорност на распространување R како и оценката на условите за безбедност да бидат изведени што е можно попрецизно.

Како што е познато, отпорноста на распространување на заземјувачот R е директно пропорционална на вредноста на специфичната отпорност на тлото ρ 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 струјата низ земјата ја спроведува така формиранитот раствор на солите кој претставува електролит и којшто го исполнува празниот простор помеѓу честичките на 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 и висока специфична отпорност.

Сосема е поинаква ситуацијата кај **пропусливите** и **растресити земјишта** какви што се нпр. песокот и чакалот. Кај нив специфичната отпорност во основа зависи од присуството и количеството на глина, измешана низ земјиштето. Така, на пример, чистиот чакал, без присуство на глина може да има отпорност $\rho = 2000 \div 6000 \Omega m$, додека истиот тој чакал со примеси на глина од 20-тина проценти ќе има тројно помала вредност за ρ .

Влажност на земјата

Земјата низ 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.

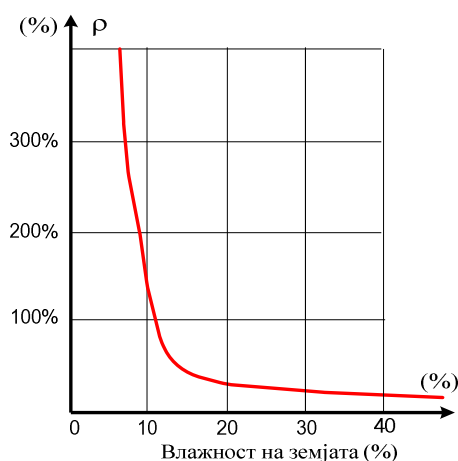
Во однос на влажноста кај земјата разликуваме три состојби:

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



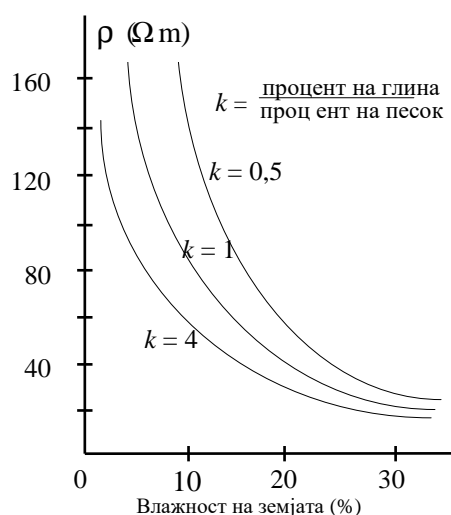
Слика 8.2 Зависност на отпорноста ρ на земјата од нејзината влажност

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 на 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 тоа намалување 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.

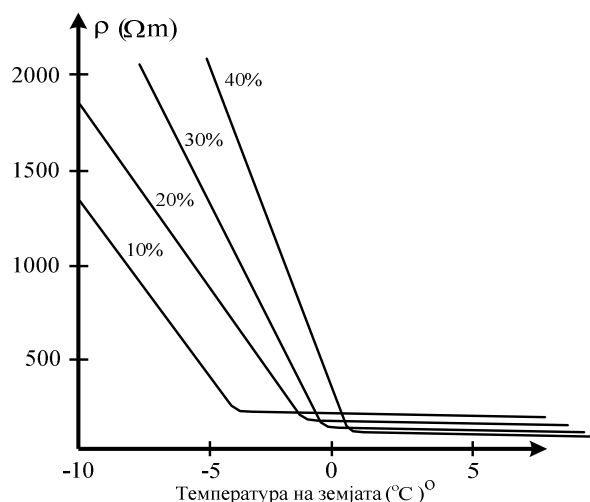
На сликата 8.3 е дадена промената на специфичната отпорност на земјата (смеша од глина и песок) во зависност од процентот на влага во земјата.



Слика 8.3 Зависност на специфичната отпорност ρ на земјата (смеша од глина и песок) од процентот на влажноста

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

На сликата 8.4 дадена е зависноста на специфичната отпорност на земјата од температурата при различен процент на вода во земјата.



Слика 8.4. Зависност на отпорноста ρ од температурата и влажноста на почвата

Соленост на земјата

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

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.

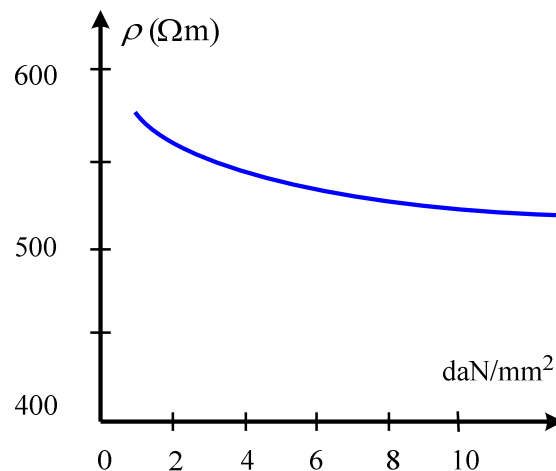
Во табелата 8.1 е даден преглед на специфичните отпорности на распростирање на некои средини.

Табела 8.1 Специфични отпорности на некои почви

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

Набиеност на земјата

Набиеноста на земјата е исто така важен фактор кој влијае врз вредноста на специфичната отпорност. 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 активниот пресек на водата. Ова е една од причините зошто земјата околу заземјувачот се набива. На сликата 8.5 прикажано е влијанието на притисокот врз специфичната отпорност на земјата.



Слика 8.5. Влијание на притисокот врз специфичната отпорност ρ на земјата

Мерење на специфичната отпорност на тлото

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

$$R = r \cdot \frac{\rho}{100} \quad (8.1)$$

каде што е:

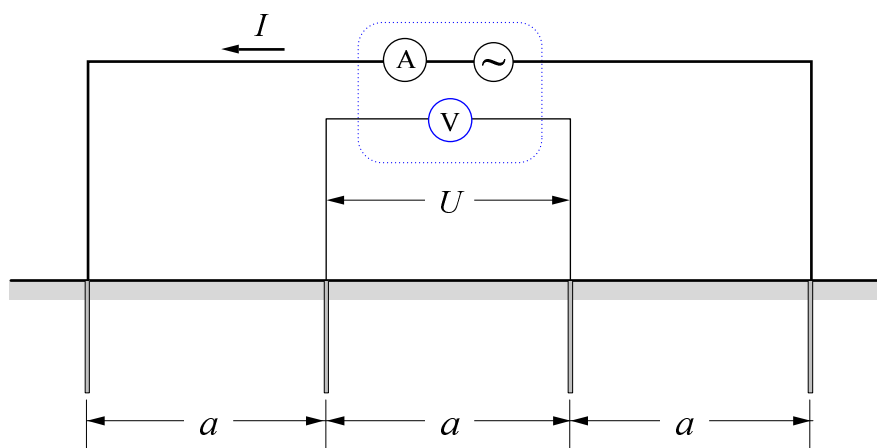
ρ - специфичната отпорност на тлото, изразена во Ωm ;

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

Структурата на тлото најчесто не е **хомогена** туку **слоевита**. Дури и во релативно хомогените геолошки структури, кога тлото е составено од една единствена врста 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, 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 . 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 8.6. Распоред на мерните сонди според Венеровиот метод

Мерењето на вредноста на специфичната отпорност 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 8.6 и како што се гледа, тие се поставуваат на еднакви меѓусебни растојанија a . Надворешните сонди се приклучени на струен извор со кој се создава потенцијално поле во просторот на проспекција, додека внатрешните, напонски сонди, се приклучени на 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 низ струјните сонди и напонот U помеѓу напонските сонди. Од пресметката на струјното поле следува релацијата (8.2) со која се пресметува вредноста на просечната специфична отпорност на тлото ρ :

$$\rho = 2\pi \cdot a \cdot \frac{U}{I} = 2\pi \cdot a \cdot R \quad (8.2)$$

Ознаките кои фигурираат во изразот (8.2) се во согласност со претходниот текст и со сликата 8.6.

Со формулата (8.2) 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 $a > 10 m$ 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 влијанието на водот на другите инсталации во близина на трасата (т-водови, цевководи и сл.).

При организирањето на мерењата на специфичната отпорност на тлото ρ редовно се поставува 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. Така, на пример, 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 ќе биде мерење на специфичната отпорност на тлото ρ на секое столбно место.

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 (8.2) 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.

8.2.2 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 $\rho < 20 \Omega m$ е силно агресивно, додека пак тлото со отпорност $\rho > 60 \Omega m$ 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 $+0,377 V$) ќе има изразита предност пред непоцинкуваното железо ($-0,44 V$) или пред цинкот, односно поцинкуваното железо ($-0,763 V$). Затоа, во алувијалните подрачја со мала специфична отпорност и висока влажност како материјал за изведба на заземјувачите често се користи бакарно јаже.

Векот на траењето на поцинкуванкуваните челични ленти, кои во практиката најмногу се користат, зависи во најголема мера од квалитетот на самото поцинкување. Во таа смисла е утврдено дека добро поцинкуваната челична лента во почви со нормална корозиска агресивност е сосема рамноправна со бакарното јаже. Лошо поцинкуваната лента или пак лентата кај која поради лоша манипулација при транспортот и полагањето или поради несоодветното спојување дошло до оштетување на цинковиот заштитен слој може да има сосема мал век на траење - во влажно тло само неколку години.

8.2.3 Материјали за изработка на заземјувачите и видови заземјувачи

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

Зависно од средината во која се положуваат заземјувачите (чиста, сува влажна, агресивна) брзината на појава на корозија ќе биде различна. Содржината на гасовите O_2 , SO_2 , CO_2 во тлото ја забрзуваат и помагаат корозијата на поцинкуваното железо и со тоа му го скратуваат животниот век. Ако тенкиот слој цинк е нагрizen и 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 8.2.

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.

Според начинот на полагање, заземјувачите кои се применуваат кај надземните водови се делат на:

- хоризонтални и
- вертикални.

додека **според обликот**, тие се делат на:

- прстенести и
- зракасти (свездести).

Во нашата практика најчесто се применуваат **хоризонталните заземјувачи**, додека **вертикалните заземјувачи (сонди)** кај надземните водови се користат многу поретко и тоа само во некои специјални случаи, кога земјата е слоевита и кога долните слоеви имаат значително помала специфична отпорност во однос на горниот слој или пак кога просторот за изведба на самиот заземјувач околу столбот е многу ограничен. Хоризонталните заземјувачи најчесто се изведуваат од поцинкувани челични ленти или пак од поцинкувано валчесто железо, а во некои случаи се применува и бакарно јаже.

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 8.2). 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).

Табела 8.2 Најмалите дозволени пресеци на елементите од заземјувачите, според Правилникот [1]

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

8.3 ОСВРТ КОН ПРОПИСИТЕ ЗА ЗАЗЕМЈУВАЊЕ НА СТОЛБОВИТЕ

8.3.1 Општи одредби

Со Правилникот за техничките нормативи за градба на надземни електроенергетски водови со номинален напон од 1 kV до 400 kV (Сл. лист на СФРЈ бр. 65/1988) [1], којшто е сè уште на сила и во Република Македонија, се определени условите кои мораат да ги задоволат заземјувачите од далекуводните столбови. Општо гледано, со заземјувачите на столбовите треба **да се постигне**:

- **сигурност на водот во погонот**, т.е. појавата на повратен прескок при удар на гром во далекуводот да се спречи или да се сведе на што е можно помала мерка и
- **сигурност на луѓето и другите живи суштества** што доаѓаат во непосреден допир со столбовите од далекуводот, или поинаку кажано, да се постигне отстранување односно намалување на ризикот од појава на опасни напони на чекор или допир при појава на земни споеви.

Ова се **рамковни задачи** на заземјувачите и тие треба да бидат исполнети во што е можно поголема мера. Понатаму, со прописите од Правилникот [1] се попрецизно определени (макар што сè уште недоволно прецизно) начините на изведување на заземјувачкиот систем кај надземните водови во зависност од третманот на неутралната точка на мрежата и се утврдени минималните услови што мораат во едни или други конкретни услови да бидат постигнати, т.е. задоволени.

Технички прописи

Техничките прописи, во принцип, се **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 на еден далекувод, тие му оставаат на проектантот можност за широк избор. Изборот на типот и димензиите на заземјувачот, притоа, треба да се темели на проверената традиција, инженерското искуство но и на интуицијата на проектантот. При сето тоа безусловно треба да бидат задоволени и определени технички норми со кои се обезбедува бараната сигурност во погонот.

Прописите, значи, дозволуваат и дополнителни зафати со кои се зголемува сигурноста на водот и сигурноста на околината, а тие зафати треба да се спроведуваат ако е тоа потребно и оправдано. Одредбите од прописите се, значи, смерници, според кои се врши избор и димензионирање на заземјувачите. Вообичаен пристап притоа е воведување на фамилија тнар. **“типски” заземјувачи**, а самиот избор на типските заземјувачи треба да почива на претходни теориски анализи и да е осмислен така што тие од една страна ќе ги задоволат условите предвидени со техничките прописи, а од друга страна, максимално ќе се води сметка за економичноста.

Во натамошниот дел од текстот ќе дадеме некои поважни извадоци од Правилникот [1] кои се однесуваат на оваа проблематика.

Заземјување на столбовите во мрежите со незаземјена неутрална точка и во мрежите чија неутрална точка заземјена преку придушница

Во мрежите со висок напон ($U_n > 1 \text{ kV}$) со незаземјена неутрална точка (а такви се повеќето среднонапонски мрежи кај нас) и во мрежите чија неутрална точка е заземјена преку придушница, се претпоставува дека траењето на земјоспојот е подолго. Од тие причини отпорноста на заземјувањето R кај столбовите поставени на обработливи површини, покрај прометните патишта и во населени места мора да биде ограничена, и таа не смее да ја премине вредноста дадена со изразот:

$$R \leq R_Z = \frac{U_Z}{I_Z} \quad (8.3)$$

каде што е:

$U_Z = 125 \text{ V}$ – највисок дозволен напон на заземјувањето

I_Z – фактичка струја на земјоспојот (A), која тече на местото на земјоспојот

Во мрежите со изолирана неутрална точка I_Z е капацитивна струја на земјоспојот, а во мрежите со неутрална точка заземјена преку компензациона придушница I_Z е преостаната струја на земјоспојот.

Кај водовите со заштитни јажиња, под отпорноста R_Z се подразбира вкупната отпорност на заземјувањето сметајќи ја и врската помеѓу заштитните јажиња.

Пречекорувањето на вредноста R_Z се дозволува ако се примени една од следниве мерки:

- а) употреба на непробојни масивни или стапести изолатори;
- б) редовна контрола на изолаторите, и тоа најмалку еднаш годишно;
- в) вградување на уреди за сигнализација на земјоспојот и непосредно автоматско исклучување на водот штом ќе настане дефект.

Посебни мерки за намалување на напонот на чекор не се потребни ако е примета една од претходните мерки.

Заземјување на столбовите во мрежи со неутрална точка заземјена преку мала отпорност.

Надземните водови што и припаѓаат на мрежа со неутрална точка заземјена преку **мала отпорност**, мораат да имаат **уреди за брзо автоматско исклучување** при земјоспој кои сигурно ја исклучуваат делницата во дефект и така ја остраниваат опасноста од дејството на напонот на местото на земјоспојот. Притоа столбовите мораат, по правило, да имаат заземјувач во **форма на еден или два прстена** околу секој столб или околу сите темели на еден столб. Најмалата длабочина на вкопувањето на заземјувачот е **0.5 m**. Оддалеченоста на прстените од темелот, односно од столбот мора да биде таква што да се постигне **поповолно обликување на потенцијалот** и тоа зависи од формата и конструкцијата на темелот на столбот.

Доколку столбовите се поставуваат на **терен со голема специфична отпорност** во кој при рационална употреба на материјалот не можат да се постигнат задоволителни резултати за отпорноста на распростирање, столбовите **не треба да се заземјуваат**.

Во поглед на заштита од опасен напон на местото на земјоспој, не треба де се преземаат други посебни мерки освен претходно наведените.

Заземјување на столбовите за заштита од гром

За да се намали опасноста од прескок при удар на гром во столбот или во заштитното јаже, потребно е во согласност со избраниот степен на изолација на водот, да се определи максимално дозволената отпорност на заземјувањето, земајќи ја предвид зачестеноста и јачината на громовите, подрачјето на трасата, сигурноста на водот и зачестеноста на дефектите.

Ако со заземјувањето, определено со погоре изложените прописи, не се постигне отпорност која обезбедува заштита од гром, потребно е меѓусебно да се поврзуваат поедините заземјувачи или да се постави уште еден прстен околу сите темели на столбот на длабочина 1 m, односно да се положат зраковидни заземјувачи во вкупна должина приближно еднаква на должината на заземјувачите во вид на прстен ако тоа е поповолно со оглед на теренот. Ако со ова не се постигне отпорност која штити од повратен прескок, се остапува од натамошно полагање на заземјувачите.

Повратен прескок на изолацијата не е веројатен (според прописите) ако за големината на отпорноста на распростирање на заземјувачот R е исполнет условот (8.4):

$$R \leq R_u = \frac{U_i}{I_u} \quad (8.4)$$

каде што се:

R_u – отпорност на заземјувањето (Ω) на посматраниот столб, без врска со заштитните јажиња;

U_i – поднослив напон (V) на изолацијата на посматраниот столб;

I_u – темена вредност на ударната струја на громот (kA) за посматраниот столб.

При изборот на струјата I_u како ориентација можат да послужат вредностите во табелата 8.3, кои покажуваат колкава е веројатноста P , изразена во %, темената вредност на струјата на громот при атмосферското празнење да не ја надмине соодветната вредност од првата редица. Вредности на струјата помали од 20 kA можат да се земат само за водови со напон до 35 kV.

Табела 8.3 Веројатности (%) за појава на импулсни струи на громот со разни амплитуди

Струја на громот (kA) при удар во столб	5	10	15	20	30	40	50	60
Веројатност (%) струјата да не биде надмината	14	40	62	79	91	95	98	99

Основа за усвојување на темената вредност на ударната струја на громот I_u се податоците за зачестеноста на атмосферските празнења, **бројот на грмежливите денови во годината** или годишниот број на **ударите на гром по единица површина**, дистри-

буцијата на темената вредност на струјата на громот и саканото (усвоеното) ниво на сигурност со оглед на веројатниот број на повратни прескоци во текот на една година.

Се смета дека отпорноста на заземјувањето со која може да се смета при ударни напони на гром, е приближно еднаква на отпорноста на заземјувањето која се добива со вообичаените мерења со наизменична струја, иако тоа не е сосема така.

Заземјување на заштитните јажииња

Заштитното јажие на металните (челично-решеткастите) столбови може да се заземји преку конструкцијата без посебен вод за заземјување, ако конструкцијата е заземјена.

Заштитното јажие на армиранобетонските столбови може да се заземји преку челичната арматура во бетонот, ако пресекот на арматурата изнесува најмалку 50 mm² и ако сите делови на арматурата што служат за заземјување имаат сигурен контакт. Ова се однесува и на носачите на изолаторите.

На дрвените столбови не се изведува заземјување, освен ако тие носат заштитно јажие или ако металните делови треба да се заземјат. Во тој случај заземјувањето се изведува на ист начин како кај металните и армирано-бетонските столбови.

Водови за заземјување

Водовите за заземјување (земјоводите) се поставуваат за да се оствари галванска врска помеѓу заштитното јажие/јажииња и заземјувачите.

Најмали дозволени пресеци за заземјување се:

- за челик поцинкуван со топла постапка 50 mm²;
- за алуминиум 35 mm²;
- за бакар 16 mm².

Ако земјоводите се полагаат голи во земја, тие се сметаат како дел од заземјувачот.

Ако на местото на преминот на земјоводот во земја се очекува засилена корозија, потребно е водот да се заштити со премачкување, со засилување на пресекот или со слична мерка. Исто така ако постои опасност од механичко оштетување, земјоводот мора да се заштити.

Заземјувачи

Заземјувачи се металните делови што се наоѓаат во земјата и што остваруваат електрична спроводна врска на делови од водот со земјата. Како материјал за заземјувачи се употребува челик поцинкуван со топла постапка или на некој друг начин заштитен од корозија, ако локалните прилики не бараат употреба на некој друг материјал (на пр. бакар). За заземјувачи, по правило, не се употребуваат непоцинкувани челични цевки, профили и лесни материјали.

8.4 ТЕХНИЧКА ПРЕПОРАКА ТП–9

Во бившата СФРЈ и во Република Македонија, во последните дваесетина години доста често се применуваа одредбите од техничката препорака бр. 9⁽¹⁾ на Електростопанството на Србија (ЕПС). Оваа препорака се однесува на изведбата на заземјувањето и на заземјувачите на столбовите на надземните електроенергетски водови за 1 kV, 10 kV, 20 kV, 35 kV и 110 kV кои се користат во дистрибутивните мрежи или се приклучени на нив. Препораката е усогласена со постојните важечки македонски прописи и стандарди и претставува еден вид смерници, проверени и корисни за практична примена.

8.4.1 Основни технички услови за изведување на заземјувањето на столбовите

Металните и армиранобетонските столбови, според оваа препорака, **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 на нив се наоѓа 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 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 одводниците на пренапони кои се наоѓаат на столбот.

Како материјал за изведување на заземјувачите треба да се користи округла поцинкувана челична жица со дијаметар 10 mm. Дозволено е користење на поцинкувани челични ленти со пресек од најмалку **100 mm²**, но не потенки од **3,5 mm**. Дебелината на цинкот над челикот треба да изнесува најмалку **70 μm**. Во исклучителен случај, кога почвата е агресивна спрема челикот (железото), како заземјувач треба да се користи бакарно јаже со пресек од најмалку **35 mm²**.

¹⁾ Техничка препорука ТП-9 Електропривреде Србије (ЕПС), Београд, 2000 г. Оваа препорака е усвоена и кај нас, во Р. Македонија, во 2005 година.

8.4.2 Основни критериуми за димензионирање на заземјувачите на столбовите

Основен критериум за димензионирањето на заземјувањето и изведување на заземјувачите е **заштита 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**.

Се смета дека е постигнато задоволувачко ниво на заштита од повратни прескоци, ако ударната отпорност на заземјување изнесува $R_u \leq 15 \Omega$. Оваа вредност на отпорноста на заземјување треба да се постигне само со помош на темелот на столбот и заземјувачот, исклучувајќи го влијанието на заштитното јаже. Ако вредноста на ударната отпорност на заземјување од 15Ω не може да се постигне на економичен начин тогаш кај одделните столбови ќе треба да се засили нивната изолација или на тој дел од водот да се толерира зголемен број на дефекти.

Условите на безопасност поради **превисоки напони на допир** и чекор треба да се задоволат во следниве случаи:

- кај столбови кои се наоѓаат на терени како што се: **јавни базени, кампови**, покрај **детски игралишта** и слично, 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 и кога земјоспојот не се исклучува со дејствување на брза релејна заштита;
- кај столбови на кои се наоѓаат **линиски раставувачи**.

Условите за безопасност се задоволени ако кај столбот не може да се појави траен напон на допир поголем од 65 V .

8.4.3 Изведување на заземјувањето на столбовите на нисконапонските водови

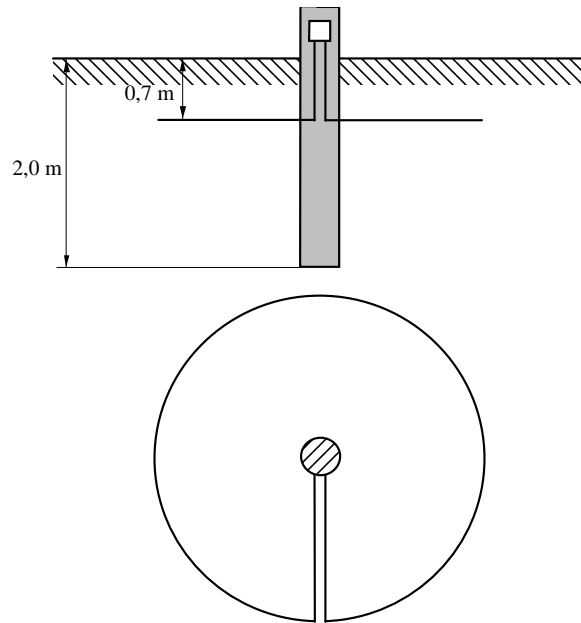
За металните и армиранобетонските столбови на нисконапонските водови **не се преземаат посебни заштитни мерки** во поглед на исполнување на условите за безбедност. **Исклучок** се столбовите кои се наоѓаат на терени како што се **камповите, детските игралишта** и сл., каде што треба да се врши обликување на потенцијалот со **прстенест заземјувач** околу столбот, поставен на далечина 1 m од работ на столбот и длабочина $0,5 \text{ m}$. Слични ефекти се постигаат со **изолирање на стојалиштата** со ширина $1,25 \text{ m}$ по пат на **асфалтирање** или пак со посипување на **крупен слабспроводен песок**.

Ако во нисконапонската мрежа и инсталациите на потрошувачите се применува TN-системот на заштита (т.н. „нуловање“) како заштитна мерка од превисок напон на допир, столбовите не се „нуловаат“. Исклучок се оние столбови кај кои се изведуваат заземјувачи за намалување на отпорноста на заземјување на нултиот спроводник каде што треба нултиот спроводник директно да се поврзе со водот за заземјување и заземјувачот да е во вид на прстен.

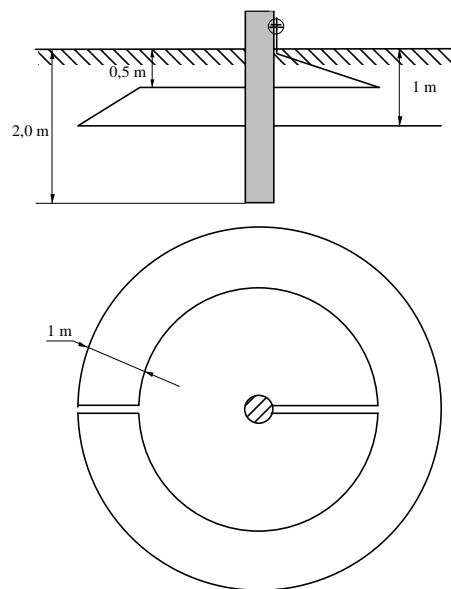
Како заземјувач на одводниците на пренапони се користи зраковиден заземјувач со четири краци или прстенест ако веќе е употребен за обликување на потенцијалот

8.4.4 Изведба на заземјувањето на столбовите на 10 kV и 20 kV водови

Заземјувачите на столбовите за 10 kV, односно 20 kV, се изведуваат со **еден прстен** (сл. 8.7) или како **свезда со четири краци** (сл. 8.9). По исклучок, тие се изведуваат со два прстена (сл. 8.8) или како свезда со три или два крака (сл. 8.10).



Слика 8.7 Заземјувач од фамилијата P1, изведен со еден кружен прстен

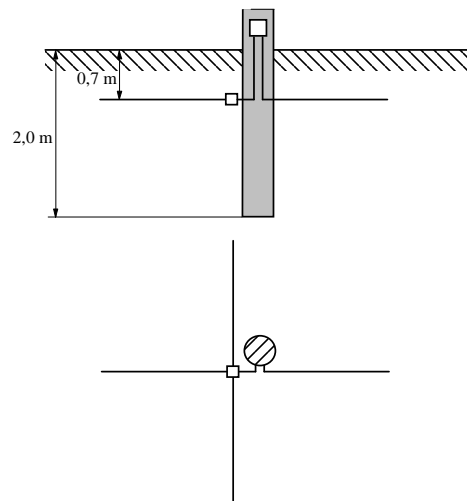


Слика 8.8 Заземјувач формиран од два кружни прстена, од фамилијата P2

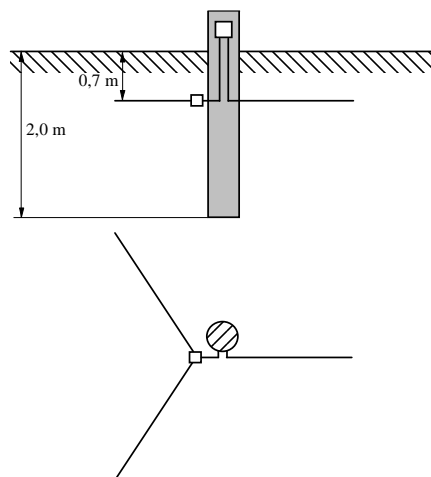
Критериумот за заштита од повратен прескок е задоволен ако е $R_u \leq 15 \Omega$ и ако таа не може да се постигне на економичен начин на овој дел од водот треба да се очекуваат зголемен број на дефекти.

Кај мрежите со незаземјена (изолирана) неутрална точка задолжително е задоволување на условите за безопасност кај столбови во населени места, покрај прометни патишта и на обработливи места.

Кај мрежите со заземјена неутрална точка преку **мала отпорност, не е потребно димензионирање** на заземјувачите спрема критериумот за заштита од превисоки напони на допир. Исклучок се столбовите кои се наоѓаат на терени каде што треба да се запазат условите за безопасност кај кои заземјувачите се изведува со два прстена.



Слика 8.9 Зракаст заземјувач од фамилијата L4 изведен во форма на четирикрака ѕвезда



Слика 8.10 Зракаст заземјувач од фамилијата L3 изведен во форма на трикрака ѕвезда

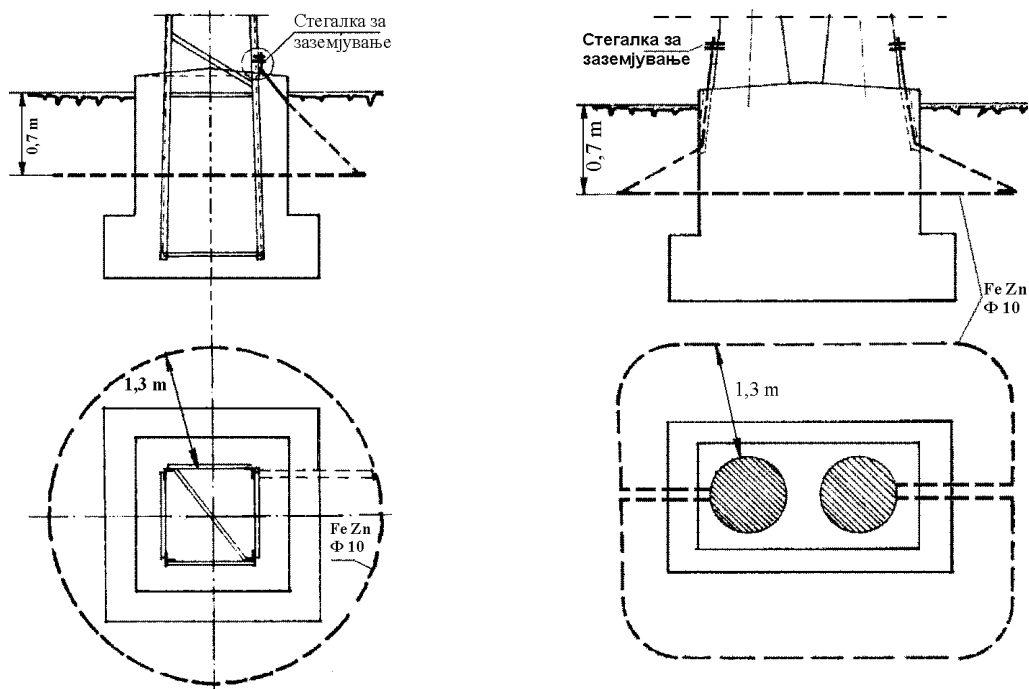
Како заземјувач на одводниците на пренапони се користи заземјувач со четири краци (со исклучок три) или со два прстена ако веќе е употребен за обликување на потенцијалот.

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.

8.4.5 Изведување на заземјувањето на столбовите на 35 kV водови

Заземјувачот кај овие столбови се изведува со еден прстен на растојание 1,3 m од столбот. На сликата 8.11 е прикажан пример за изведба на заземјувач на еден носечки челично-решаткаст столб (сл. 8.11 а) и на еден специјален бетонски столб, чиј темел има форма на правоаголник (сл. 8.11 б). По исклучок, кога се бара зголемена безбедност (за столбовте кои 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. 8.9 односно сл. 8.10.



**Слика 8.11 Изведба на заземјувачите кај 35 kV надземни водови:
а) челично-решаткаст и б) бетонски, специјален**

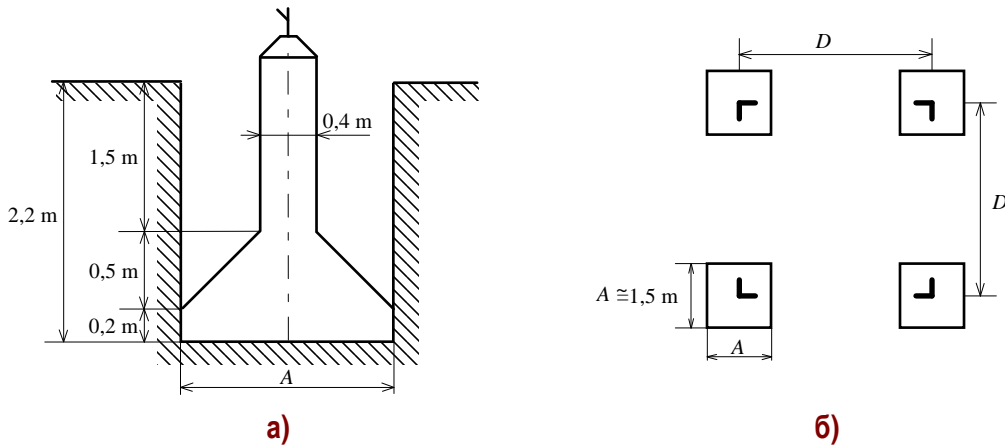
Кога неутралната точка во 35 kV мрежи е заземјена преку мала отпорност, тогаш не е потребно димензионирање на заземјувачот спрема критериумот за заштита од превисоки напони на допир. Исклучок се столбовите што се наоѓаат на претходно споменатите терени, каде што треба да се запазат условите за безопасност. Кај нив заземјувачот се изведува со два прстена, и тоа е доволна мерка.

Како заземјувач на одводниците на пренапони се користат заземјувачи со 4 краци со должина на еден крак 2,5 m или со два прстена ако веќе прстените се употребени за обликување на потенцијалот.

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.

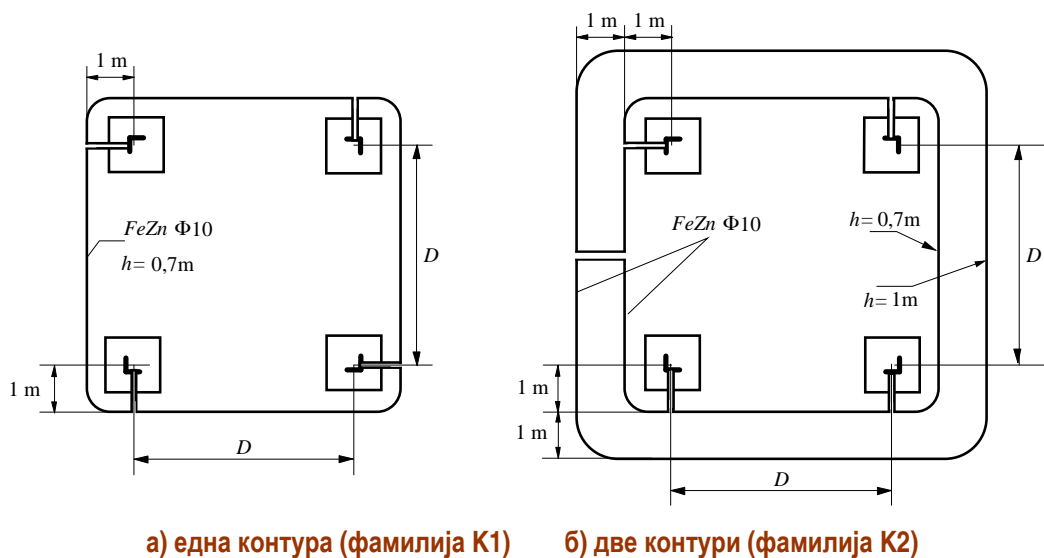
8.4.6 Изведување на заземјувањето на столбовите на 110 kV водови

За заземјување на 110 kV столбови се користат прстенести заземјувачи. Темелот на овие столбови е расчленет, составен од четири стопа (сл. 8.12 а), симетрично поставени во однос на оската на столбот, како што е тоа прикажано на сликата 8.12 б. 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 на столбот (сл. 8.13 а). Заземјувачот се поврзува барем на две места со конструкцијата на столбот. Кај столбовите со 4 стопа се препорачува секој крак на столбот да има свој приклучок на заземјувачот.



Слика 8.12 Заземјувач на еден 110 kV столб.

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



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

Слика 8.13. 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. 8.13 б). Притоа, втората контура се поставува на растојание 1 m од првата и на длабочина од $h \approx 1 \text{ m}$.

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 + 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.

8.4.7 Примена на заштитни јажиња

Заштитното јаже служи за заштита на водот од директен удар на гром. Се поставува доволно високо над фазните спроводници така што да обезбеди заштитен агол од најмногу 30°.

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 што ја напојува тој вод.

10 kV и 20 kV водови се градат без заштитно јаже. Исклучок се водовите кои 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.

8.4.8 Мерење на отпорноста на распростирање на заземјувачите на столбовите

Пред активирање на високонапонскиот вод треба 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. Заштита од повратен прескок е постигната ако со мерењето се добие:

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

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

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:

$$R_u \leq 10 \Omega.$$

Специфичната отпорност на распростирање на тлото посебно не се мери.

8.5 ИЗБОР И ДИМЕНЗИОНИРАЊЕ НА ЗАЗЕМЈУВАЧИТЕ НА СТОЛБОВИТЕ

8.5.1 Димензионирање на заземјувачите на столбовите

Решавањето на сложените заземјувачи со произволна геометрија и димензии во основа се состои во примената на некоја нумеричка постапка базирана на пресметувањето на квазистационарното струјно поле во земјата, создадено од соодветен број праволиниски елементи (електроди) со кои се моделира самиот заземјувач. Притоа се решава системот Максвелови равенки кој произлегува од теоријата на полето и во тој случај најголем проблем е определувањето на сопствените и меѓусебните отпорности на системот Максвелови равенки.

Кога станува збор за сложени заземјувачи составени од голем број линиски елементи (електроди) во форма на ленти, јажиња, метални цевки и слични елементи, а притоа вкупната должина на заземјувачот не надминува 200 метри, за определувањето на споменатите меѓусебни отпорности како најпогоден се покажал методот на средни потенцијали. Неговата точност е особено голема кога заземјувачот може да се претстави како множество од праволиниски елементи чии што должини се значително поголеми од нивните напречни димензии.

Методот не внесува никакви ограничувања во поглед на димензионалноста на проблемот и геометријата на самиот заземјувач и прифаќа било каква заемна положба во просторот. Самиот метод е одамна познат и е опишан во соодветната литература. Врз основа на него, на Електротехничкиот факултет во Скопје, на Институтот за Преносни електроенергетски системи, е изготвена компјутерска програма наречена “ZAZEM”, наменета за решавање на сложени заземјувачи со произволни димензии и произволна геометрија.

Бидејќи денес практично на секој проектант му е достапен таквиот вид софтверска алатка, понатаму отпаѓа потребата од приближни пресметки на заземјувачите со помош на некогаш користените емпириски формули за пресметување на одделните конфигурации заземјувачи. Сепак, во прилогот П1 се дадени некои од нив, кои се однесуваат на кај нас најчесто употребуваните елементарни типски форми заземјувачи кои што се применуваат кај нас и кои се впрочем предвидени и со техничката препорака ТП 9 на ЕПС. Во прилозите П2 ... П5, пак, се изнесени основните параметри на поголем број типски форми заземјувачи на столбовите од надземните водови. Формулите изложени во прилогот П1 се апроксимативни, но притоа грешката за вредноста на отпорноста на распростирање на заземјувачот R , по правило, не ја надминува вредноста 5%. Врз основа на нив е нацртан дијаграмот во прилогот П1. Кривите од овој дијаграм се однесуваат на случајот $h = 0,8 \text{ m}$, но без значителни грешки можат да се применуваат и за други вредности на длабочината h .

Со пресметките на отпорноста на распростирање на горе споменатите типски форми заземјувачи на столбовите од надземните водови се доаѓа до следните општи констатации:

- големината на пресекот/пречникот на елементите (електродите) од кои е изведен заземјувачот има сосема незначително влијание врз константите на заземјувачот (отпорност на распростирање R и потенцијалните разлики на чекор ΔE_c и допир

ΔE_d) поради што пресекот треба да се утврдува само врз основа на термичкиот критериум и потребите за заштита од корозија;

- длабочината на закопување на заземјувачите h исто така има мало влијание врз параметарот R . Затоа длабочината h треба да се избере така што заземјувачот ќе биде и во зимскиот период надвор од слојот земја што замрзнува. Наедно, тука треба да се води сметка и за можноста за механичко оштетување на заземјувачот кога тој се наоѓа закопан во обработливо земјиште, така што е препорачливо стандардната длабочина на закопување да биде најмалку **0,5 m**, додека на обработливите површини, најмалку **0,8 m**;
- во случајот на примената на **зракастите заземјувачи** не е рационално да се користат **повеќе од 4 крака**, а нивната должина не треба да надминува повеќе од **40 m**.

8.5.2 Избор на тип и димензии на заземјувачот

Изборот на конфигурацијата и димензиите на заземјувачите од надземните водови се врши врз основа на:

- познатата вредност на **струјата на еднофазна куса врска/земен спој**;
- избраната вредност на **струјата на громот** во столбот или во заштитното јаже, во непосредна близина на столбот, што е сврзано со однапред усвоеното ниво на ризик за испад на водот под дејство на атмосферските пренапони.

Може да се каже дека техничката препорака ТП 9 во основа дава добри смерници кои му помагаат на проектантот при изборот на типот и димензиите на заземјувачот. Сепак, во основа, при изборот на типот на заземјувачот треба да се води сметка за следното.

Изборот на **контурните и прстенестите заземјувачи** е сврзан со условите за **заштита од превисоките напони на допир и чекор**. Притоа со погоден избор на соодветна конфигурација (еден или два прстена, употреба на дополнителни хоризонтални краци и сл.) и погоден избор на димензиите и длабочината на закопување на заземјувачот, проектантот се труди да ја постигне бараната вредност на отпорноста на распростирање R и да **обезбеди најповолна распределба на потенцијалите** во околината на посматраното столбно место. При ваквиот избор тој може да се служи со табелите од прилозите П1 и П2 во кои се дадени отпорностите на распростирање R односно константите на заземјувачите r за голем број типски заземјувачи на столбови.

Зракастите заземјувачи се избираат во услови во кога единствен критериум за нивниот избор и димензионирање е **заштитата на водот од атмосферски пренапони**. Со други зборови кажано, зракастите заземјувачи се избираат тогаш кога поради високата специфична отпорност на тлото или поради релативната непристапност до столбното место не се бара никаква заштита од дејствувањето на напонот на чекор/допир на лице место.

Бројот на краците на зракастиот заземјувач се одбира така што се води сметка за реалните услови и можноста за нивното полагање на теренот, но и врз основа на вредноста на отпорноста ρ на посматраното столбно место. Нивната должина се одбира водејќи сметка за условот за безопасност (8.3) односно условот на заштита од повратен

прескок, во согласност со релацијата (8.4) при што е корисно и рационално да се употребуваат податоците од табелите кои се наоѓаат во прилозите П1 ... П5.


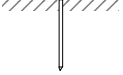
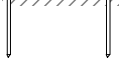

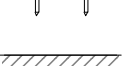


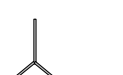

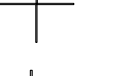

Што се однесува до дилемата дали на терен со висока специфична отпорност да се предвиди заземјувач со 3 или пак со 4 краци, треба да се има предвид дека заземјувачот со 3 краци претставува порационално и поекономично решение. Употребата на четвртиот крак има оправдување само тогаш кога, меѓу другото, се сака да се постигне и поповолна распределба на потенцијалите во околината на столбното место.

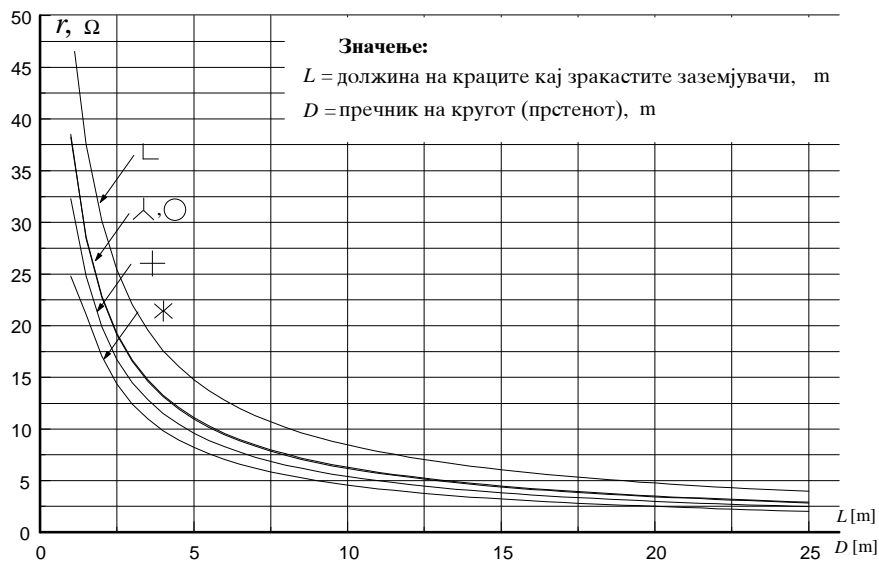
8.5.3 Полагање на заземјувачите во земја

После полагањето на заземјувачот во ровот, тој се затрупува со самиот ископ доколку тој не содржи материјали со висока специфична отпорност (шут, камења, чакал и сл.). Во спротивно, затрупувањето треба да се изврши со материјал кој има **добра електрична спроводност**. Кога на околниот терен не е можно за таа цел да се обезбеди доволно количество **добро спроводна земја**, а условите за сигурност и безбедност бараат намалување на отпорноста на распростирање на заземјувачот, тогаш е препорачливо да се испита оправданоста за примена на материјали со добра електрична спроводност каков што е, на пример, **бентонитот**. Неговата примена дава добри технички ефекти бидејќи на тој начин се намалува не само **отпорноста на распростирање** на заземјувачот, туку и **напоните на допир и чекор**. Во литературата се среќаваат трудови во кои се наведува дека со примена на бентонитот кај вертикалните заземјувачи (сонди) положени во тло со висока специфична отпорност ρ , отпорноста на распростирање на заземјувачот R се намалува за **3 до 4 пати**. До слични заклучоци (добиеени по експериментален пат на пробни полигони во СФРЈ) се дошло и во случајот кога е применуван бентонит кај зракастите заземјувачи поставени во тло со специфична отпорност $\rho \geq 500 \Omega\text{m}$. Кај нив е постигнато намалување на отпорноста R за **$1,8 \div 2$ пати**.

Во секој случај примената на бентонитот, заради намалување на отпорноста на распростирање на заземјувачот R , треба да биде економски оправдана. Притоа ова решение бездруго ќе треба да се спореди со алтернативните решенија какви што се, на пример, **зголемувањето на димензиите** на заземјувачот, доведување до столбното место **добро спроводна земја** од други локации, поставување **дополнителни прстени** или ленти и др.

Прилог П1. Апроксимативни формули за пресметка на отпорноста на распространување на некои елементарни заземјувачи, поставени во хомогено тло и дијаграми за определување на нивните константи на распространување

	Полутопка со пречник D	$R = \frac{\rho}{\pi D}$
	Цевка со должина L и радиус a , закопана вертикално	$R = \frac{\rho}{2\pi L} (\ln \frac{4L}{a} - 1)$
	Две цевки со должина L и радиус a , закопани вертикално на меѓусебно растојание s ($s > L$)	$R = \frac{\rho}{4\pi L} (\ln \frac{4L}{a} - 1) + \frac{\rho}{4\pi s} (1 - \frac{L^2}{3s^2} + \frac{2L^4}{5s^4} \dots)$
	Две цевки со должина L и радиус a , закопани вертикално на меѓусебно растојание s ($s < L$)	$R = \frac{\rho}{4\pi L} (\ln \frac{4L}{a} + \ln \frac{4L}{s} - 2 + \frac{s}{2L} - \frac{s^2}{16L^2} + \frac{s^4}{512L^4} \dots)$
	Јаже (лента) со должина L и радиус a , закопани хоризонтално на длабочина h	$R = \frac{\rho}{2\pi L} (\ln \frac{2L}{a} + \ln \frac{L}{h} - 2 + \frac{2h}{L} - \frac{h^2}{L^2} + \frac{h^4}{2L^4} \dots)$
	Двокрака ѕвезда, со должина на краците L , закопана на длабочина h	$R = \frac{\rho}{4\pi L} (\ln \frac{2L}{a} + \ln \frac{L}{h} - 0,2373 + 0,4292 \frac{h}{L} - 0,414 \frac{h^2}{L^2} + 0,67 \frac{h^4}{2L^4} \dots)$
	Трикрака ѕвезда, со должина на краците L , закопана на длабочина h	$R = \frac{\rho}{6\pi L} (\ln \frac{2L}{a} + \ln \frac{L}{h} + 1,071 - 0,209 \frac{2h}{L} + 0,238 \frac{4h^2}{L^2} - 0,054 \frac{16h^4}{L^4} \dots)$
	Четирикрака ѕвезда, со должина на краците L , закопана на длабочина h	$R = \frac{\rho}{8\pi L} (\ln \frac{2L}{a} + \ln \frac{L}{h} + 2,912 - 1,071 \frac{2h}{L} + 0,645 \frac{4h^2}{L^2} - 0,145 \frac{16h^4}{L^4} \dots)$
	Шестокрака ѕвезда, со должина на краците L , закопана на длабочина h	$R = \frac{\rho}{12\pi L} (\ln \frac{2L}{a} + \ln \frac{L}{h} + 6,851 - 3,128 \frac{2h}{L} + 1,758 \frac{4h^2}{L^2} - 0,490 \frac{16h^4}{L^4} \dots)$
	Кружен прстен со пречник D , пречник на јажето d , закопан на длабочина h	$R = \frac{\rho}{2\pi D^2} (\ln \frac{8D}{d} + \ln \frac{2D}{h})$
	Кружна плоча со пречник D , хоризонтално закопана на длабочина h	$R = \frac{\rho}{4D} + \frac{\rho}{8\pi h} (1 - \frac{7}{48} \frac{D^2}{h^2} + \frac{33}{640} \frac{D^4}{h^4} + \dots)$

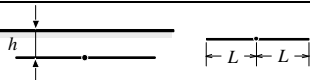
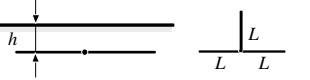
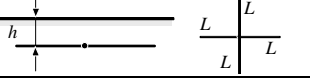
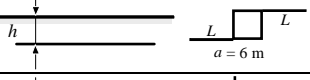
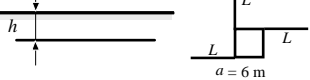
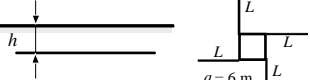
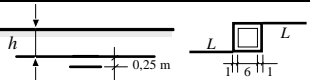
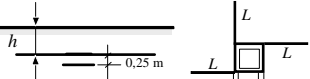
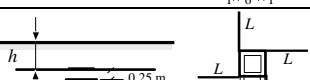


Прилог П2 Константи на отпорноста на распростирање на некои типски заземјувачи, r (Ω), (заземјувачот е поставен во хомогено тло со спец. отпорност $\rho = 100 \Omega\text{m}$)

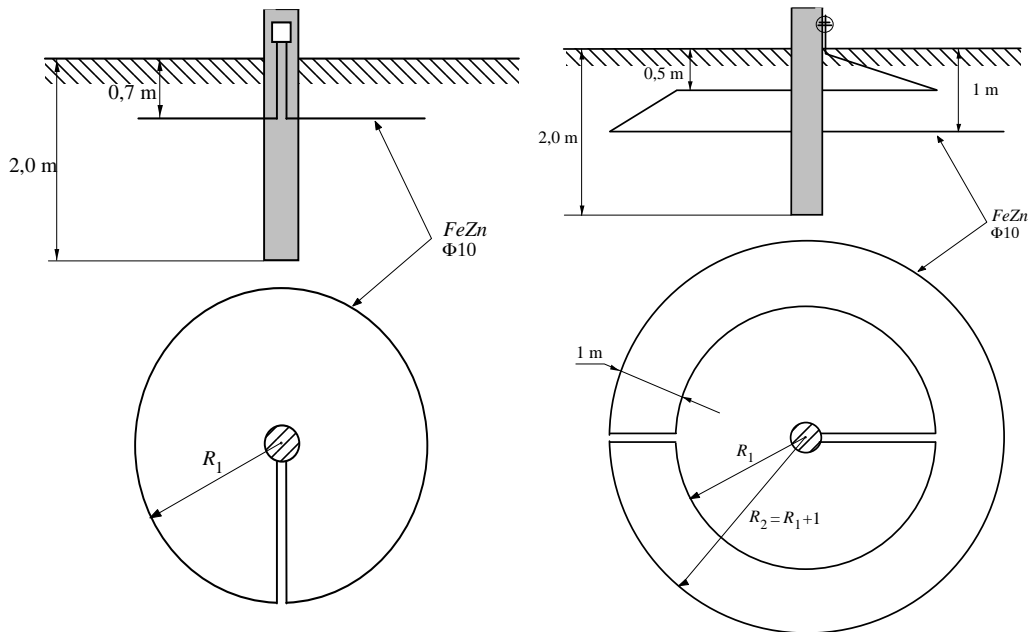
Контрурни заземјувачи

	Ознака	h m	Должина на страницата a , m							
			1	2	4	5	6	8	10	12
	P	0,50	31,1	19,6	11,4	9,5	8,2	6,5	5,4	4,6
		0,75	27,2	18,1	10,9	9,1	7,9	6,2	5,2	4,4
	2P	0,50	12,6	10,0	7,0	6,1	5,5	4,5	3,9	3,4
		0,75	11,8	9,5	6,8	5,9	5,3	4,4	3,7	3,3

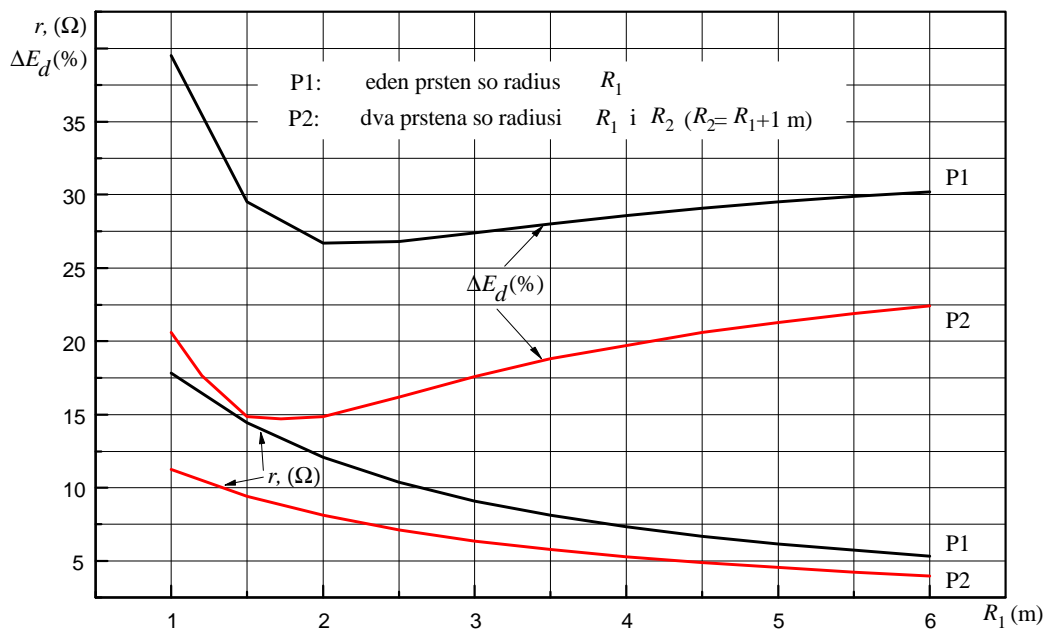
Зракасти и комбинирани заземјувачи

	Ознака	h m	Должина на кракот L , m							
			5	10	15	20	25	30	35	40
	2L	0,50	14,6	8,4	6,0	4,7	3,9	3,4	3,0	2,6
		0,75	14,0	8,1	5,8	4,6	3,8	3,3	2,9	2,6
	3L	0,50	11,5	6,5	4,6	3,6	3,0	2,6	2,3	2,0
		0,75	11,0	6,3	4,5	3,5	2,9	2,5	2,2	1,9
	4L	0,50	9,8	5,5	3,9	3,1	2,5	2,1	1,9	1,7
		0,75	9,4	5,3	3,8	3,0	2,0	2,1	1,8	1,6
	P+2L	0,50	6,5	5,2	4,3	3,6	3,2	2,8	2,5	2,3
		0,75	6,3	5,0	4,1	3,5	3,1	2,7	2,5	2,2
	P+3L	0,50	6,0	4,5	3,6	3,0	2,6	2,3	2,0	1,8
		0,75	5,7	4,4	3,5	2,9	2,5	2,2	2,0	1,8
	P+4L	0,50	5,5	4,0	3,2	2,6	2,2	1,9	1,7	1,6
		0,75	5,3	3,9	3,1	2,5	2,2	1,9	1,7	1,5
	2P+2L	0,50	4,9	4,3	3,7	3,3	2,9	2,6	2,4	2,2
		0,75	4,8	4,1	3,6	3,2	2,8	2,5	2,3	2,1
	2P+3L	0,50	4,7	3,9	3,3	2,8	2,5	2,2	2,0	1,8
		0,75	4,6	3,8	3,2	2,7	2,4	2,1	1,9	1,7
	2P+4L	0,50	4,5	3,5	3,0	2,5	2,1	1,9	1,7	1,5
		0,75	4,4	3,5	2,9	2,4	2,1	1,8	1,6	1,5

Прилог П3. Константи на отпорноста на распростирање r (Ω) на некои типски прстенести заземјувачи, (заземјувачот е поставен во хомогено тло со специфична отпорност $\rho = 100 \Omega\text{m}$)

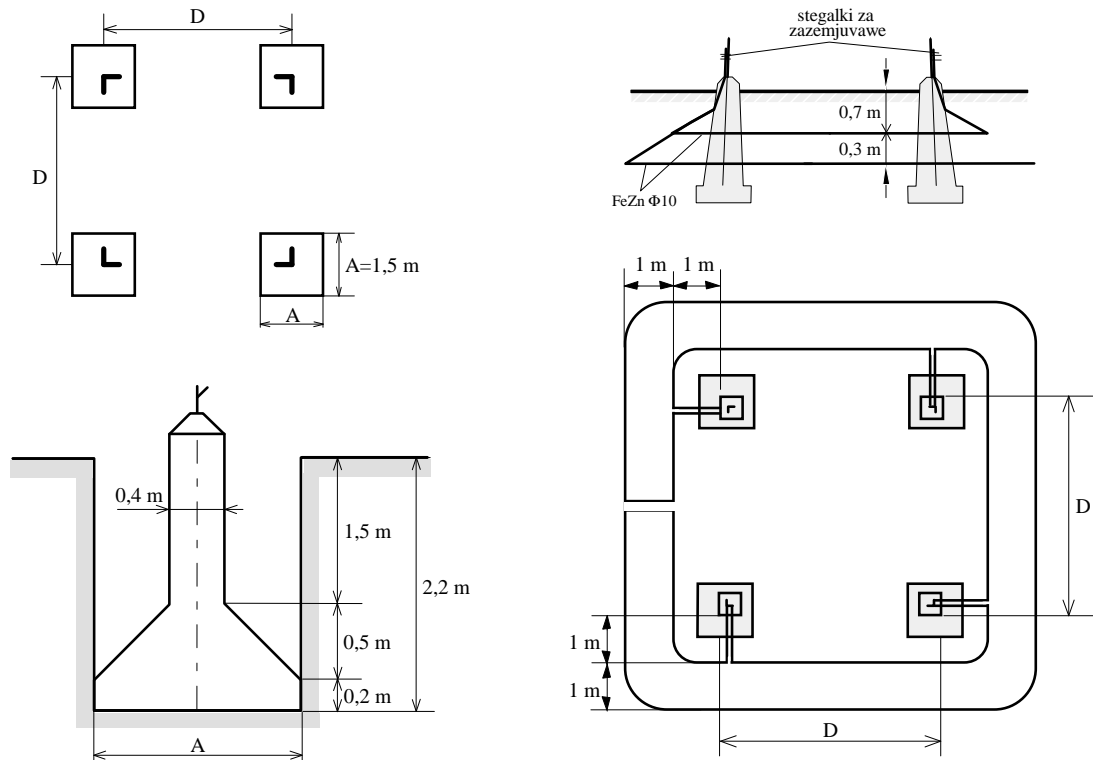


Слика П3.1 Изглед на прстенест заземјувач со еден (P1) и со два (P2) прстена, според препораката ТП.9

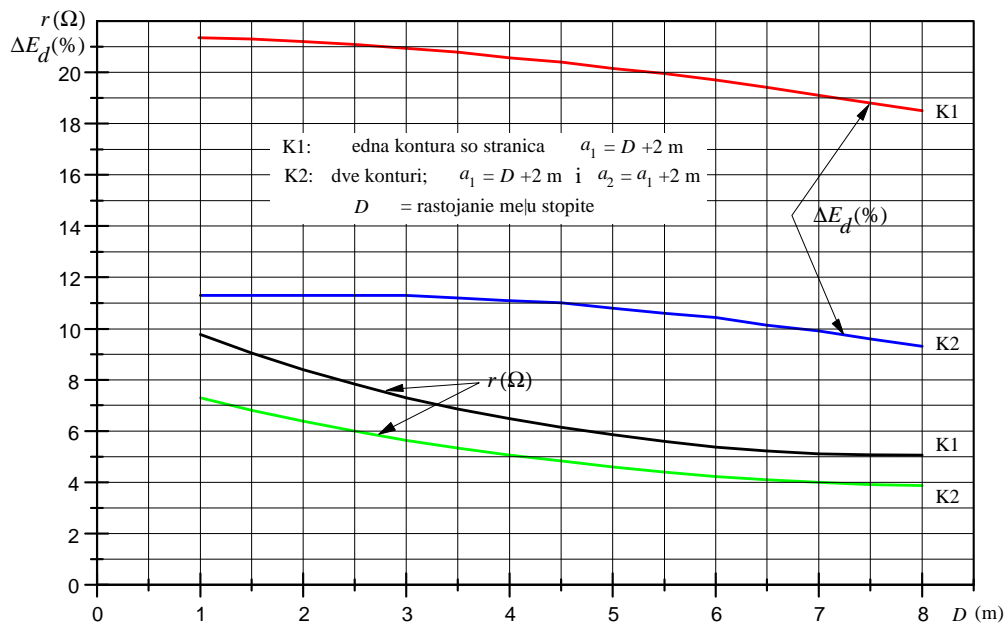


Слика П.3.2. Зависност на параметрите ΔE_d (%) и r (Ω) од радиусот R_1 на првиот прстен за заземјувачите од сл. П.3.1.

Прилог П4. Константи на отпорноста на распространување r (Ω) на некои типски контурни заземјувачи, (заземјувачот е поставен во хомогено тло со специфична отпорност $\rho = 100 \Omega\text{m}$)

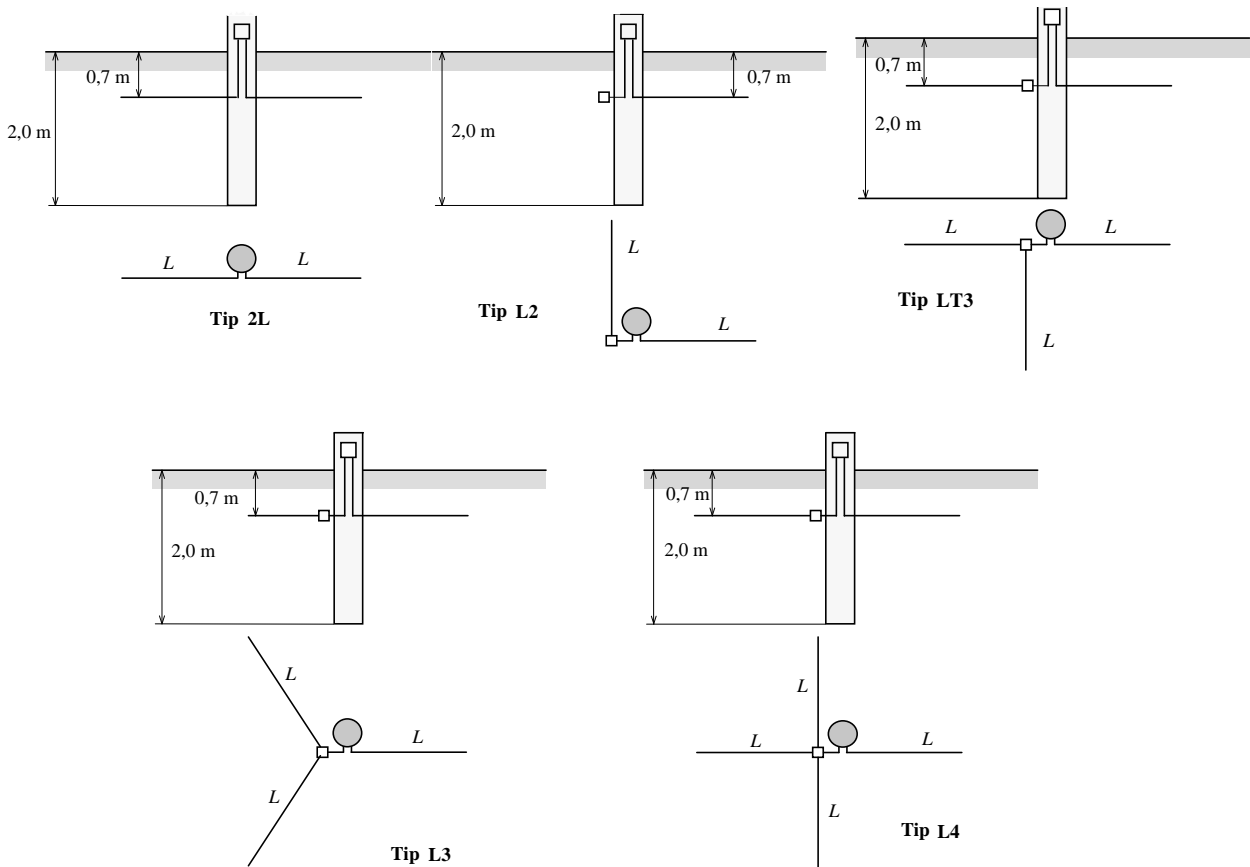


Слика П.4.1. Изглед на контурен заземјувач за 110 kV столб со две правоаголни контури (K2), според препораката ТП.9

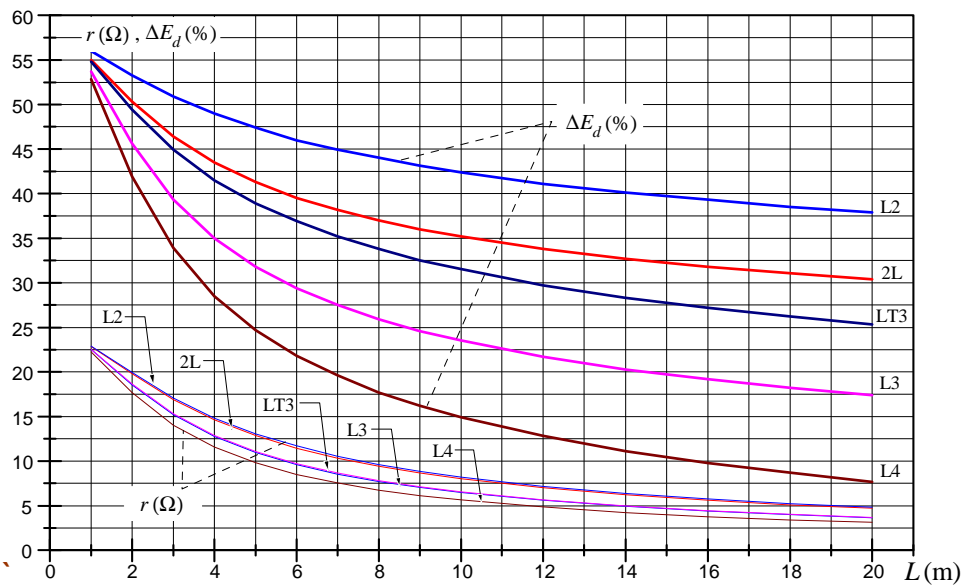


Слика П.4.2 Зависност на параметрите ΔE_d и r за контурни заземјувачи со една (K1) и со две (K2) контури

Прилог П5. Константи на отпорноста на распространување $r (\Omega)$ на некои типски сракасти заземјувачи, (заземјувачот е поставен во хомогено тло со специфична отпорност $\rho = 100 \Omega\text{m}$)



Слика П.5.1. Изглед на сракастите заземјувачи со два крака (2L) и (L2), со три краци (LT3) и (L3) и со четири краци (L4), според ТП. 9



Слика П.5.2. Зависност на параметрите ΔE_d и r за сракастите заземјувачи од сликата П.5.1

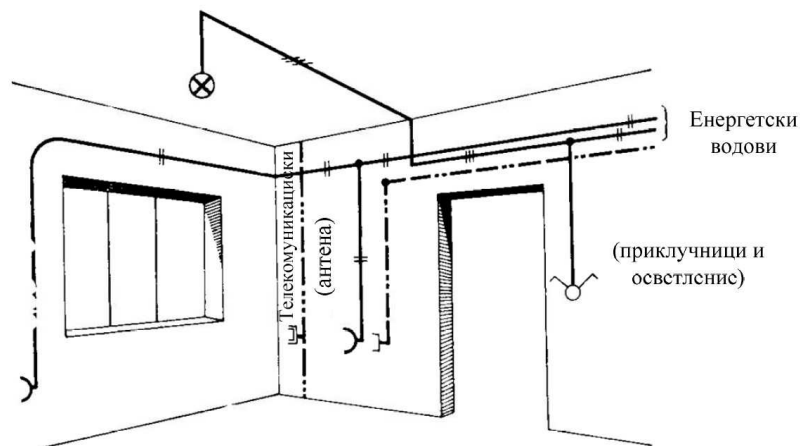
II ДЕЛ КАБЕЛСКИ ВОДОВИ

1. ОПШТО ЗА ИЗОЛИРАНИТЕ ВОДОВИ И ЕНЕРГЕТСКИТЕ КАБЛИ

Енергетските водови се основни елементи на ЕЕС кои служат за пренос и распределба на електричната енергија. Според нивната конструкција и според местото на нивната употреба, енергетските водови можеме да ги поделиме во три основни групи: а) *надземни водови* (далекуводи); б) *изолирани водови* и в) *кабелски водови* (кабли).

За надземните водови стануваше збор во претходниот дел. Нивна основна одлика е, како што тоа го кажува и самото име, фактот што спроводниците кај нив се водат над земјата и се одржуваат во просторот на определено меѓусебно растојание. Спроводниците кај надземните водови се голи (т.е. неизолирани) бидејќи како изолација се користи самиот воздух, додека изолаторите служат само за механичко зацврстување и обесување на спроводниците за конструкцијата на електричните столбови.

За разлика од надземните водови, кај изолираните водови и кај каблите, спроводниците се изолирани со сопствена изолација и тие се поставуваат под малтер, во специјални кабелски инсталации или пак директно во земјата.



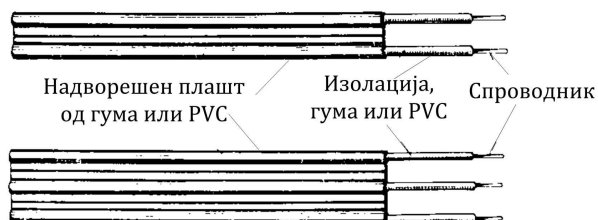
Слика 1.1. Изолирани водови (електроенергетски и телекомуникациски) положени во станбени простории

Меѓу изолираните водови и каблите сепак постојат определени разлики, како во поглед на намената и конструкцијата, така и во поглед на начинот на полагање. Основната разлика се состои во фактот што изолираните водови никогаш не се поставуваат директно во земјата, поради што тие имаат поедноставна и поефтина конструкција. Исто така, изолираните водови се применуваат главно за напони до 1 kV (освен во некои исклучителни случаи, како на пример кај електричните инсталации за осветлителните цевки), додека пак каблите се изработуваат за сите номинални напони, почнувајќи од нискиот напон 220/380 V, па сè до 220 kV и повеќе.

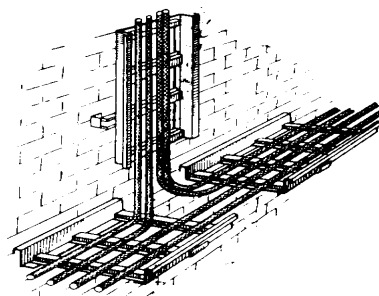
Изолираните електроенергетски водови можат да се поделат во четири групи:

- инсталациони водови;
- изолирани водови слични на каблите;
- гајтани;
- изолирани водови за посебна намена.

Инсталационите водови служат за трајно полагање во индустриските, јавните и земјоделските објекти, во стамбените и деловните простории (сл. 1.1 и 1.2) и на други места каде што постојат нормални услови за полагање. Со други зборови, тие се полагаат на места каде што не постои можност од механички напрегања и оштетувања на водовите како и можности за хемиско оштетување (присуство на агресивни хемиски материји) или термичко разорување (значително повишување на амбиентната температура) на водовите.



Слика 1.2. Инсталациони водови тип PP/R или тип PG/R за полагање под малтер



Слика 1.3 Инсталациони водови, прицврстени на ѕид и поставени на специјални конструкции



б) Изолиран вод сличен на кабел, тип GO

в) Гајтани од типот GT/P и GT

г) Самоносечки изолиран вод тип PP 00/0

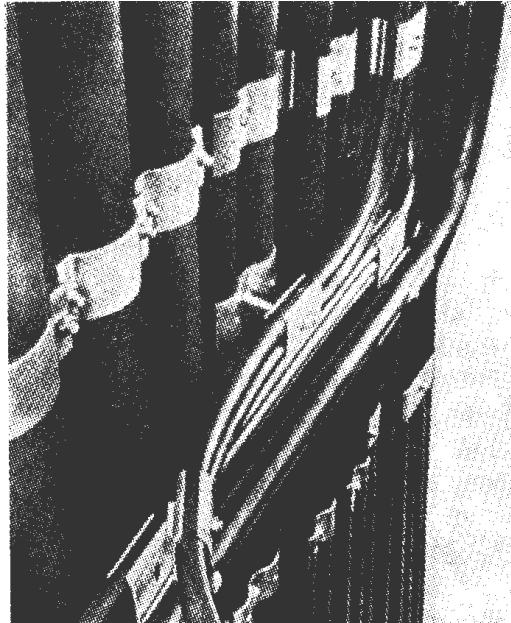
Слика 1.4. Разни видови изолирани водови

Инсталационите водови во становите, деловните простории, па и во индустриските погони, најчесто се поставуваат директно под малтер, или пак се поставуваат во засебни инсталациони цевки. Цевките можат да бидат поставени под малтерот, во малтерот или дури и над малтерот - на самите ѕидови. Во последно време, електричните инсталации се поставуваат и во самиот под. Меѓутоа, во индустриските погони преовладува полагањето на инсталационите водови на самите челични конструкции, или пак на специјални метални носачи (сл. 1.3), но често пати инсталациите се поставуваат во ѕидани канали или пак во специјални бетонски блокови.

За разлика од нив, *изолираните водови слични на кабел* (сл. 1.4 а) кои што претставуваат извесен премин од изолираните водови кон каблите, се полагаат онаму каде што постојат можности за поблаги механички или хемиски оштетувања. *Гајтаните* (сл. 1.4 б) служат за напојување на подвижните приемници (потрошувачи)

на електричната енергија поради што тие мора да бидат флексибилни. Затоа, спроводниците кај нив се изведуваат како финожични (лицнесте) а изолацијата е најчесто гума.

За конструкцијата (градбата), особините и примената на изолираните водови многу подетални информации можат да се најдат во стручната литература (н. п. [1], [2], [3]), а тие темелно се проучуваат и во дисциплината „Нисконапонски електроенергетски инсталации“. Наш натамошен предмет на интерес ќе бидат само кабелските електроенергетски водови, кои скратено се нарекуваат *кабли*.

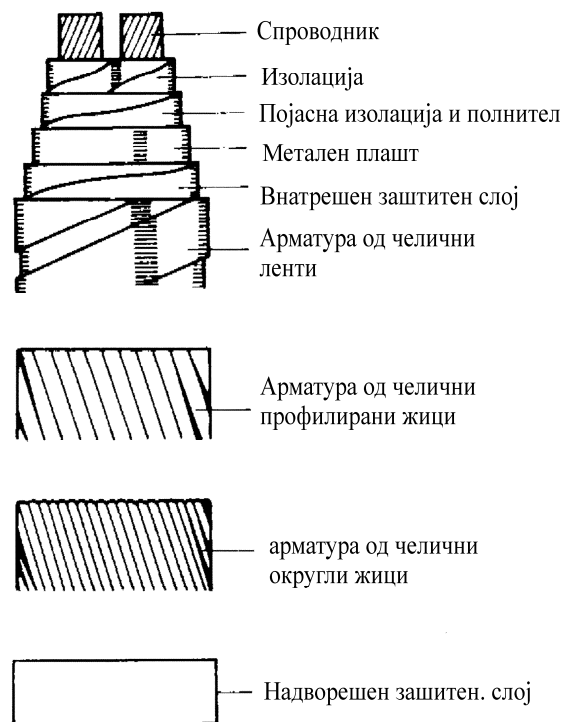


Слика 1.5 Енергетски кабли, водени паралелно

Енергетските кабли претставуваат водови составени од еден или повеќе спроводници коишто се прекриени по целата своја должина со слој од изолационен материјал а потоа сите заедно се опфатени со еден или повеќе заштитни слоеви. Еден од заштитните слоеви е внатрешниот плашт, којшто е најчесто метален и ги штити спроводниците од продор на влагата и другите штетни хемиски материи. Каблите најчесто имаат уште и механичка заштита (арматура) која овозможува тие да се користат за полагање (хоризонтално, косо или вертикално) во суви простории, во влажни простории, на отворено или директно во земјата (во т. н. кабелски ровови), под вода, во кабелски канали, во рудниците и на други места.

Каблите служат за пренос и распределба на електричната енергија. Се произведуваат практично за сите напони, почнувајќи од нискиот напон ($U_n \leq 1 \text{ kV}$), за внатрешен развод, но и за среден напон (3, 6, 10, 20, 35 и 60 kV), за распределба (дистрибуција) на електричната енергија, за висок напон (110 и 220 kV) и за највисоките напони (над 220 kV), за пренесување на електрична енергија.

2. ЕНЕРГЕТСКИ КАБЛИ И НИВНИ КОНСТРУКТИВНИ ЕЛЕМЕНТИ



Слика 2.1. Составни елементи во конструкцијата на на енергетските кабли

2.1. ОПШТО

Каблите претставуваат електроенергетски уреди со релативно сложена структура. Гледано од внатрешноста (средиштето) на кабелот спрема неговата периферија, енергетскиот кабел се состои од следните елементи: спроводник (спроводници), изолација, електрична заштита (екран), пополнување, внатрешен плашт, внатрешна заштита од корозија, арматура и надворешна заштита од корозија (надворешен плашт) (сл. 2.1). Некои типови кабли ги немаат сите наведени елементи во својата конструкција.

Основен (и единствено активен елемент на кабелот кој ја спроведува електричната струја е *спроводникот (спроводниците)*). Спроводникот се состои од една или повеќе жици, изработени од бакар или алуминиум кои се впредуваат во форма на јаже. Околу спроводникот се поставува слој од изолационен материјал изработен од поливинил-хлорид (PVC), полиетилен (PE), импрегнирана хартија (IP), гума и др., наречен *изолација* на кабелот. Изолацијата има определена дебелина и определена диелектрична цврстина, во согласност со номиналниот напон на кабелот.

Спроводникот заедно со изолатијата се нарекува *жила*. Кабелот може да има една жила (едножилен кабел) или повеќе жили (повеќежилен кабел).

Пополнување (полнител, филер) е соодветен материјал којшто се вметнува во празниот простор од кабелската конструкција и служи за постигнување кружен облик на напречниот пресек на кабелот и негова компактност.

Јадрото на кабелот е конструктивна целина што ја сочинуваат сите жили на кабелот, материјалот за пополнување и изолацијата што ги опфаќа сите жили (појасна изолација), доколку ја има. Жилите од кабелот во јадрото се меѓусебно впредени одлево надесно.

Каблите со повеќе жили и со заедничка изолација обвиеана околу сите жили се нарекуваат уште и *појасни кабли* или кабли со нерадијално електрично поле. За разлика од нив, постојат и кабли со радијално електрично поле кои уште се нарекуваат и *заштитени кабли* или *Н-кабли*. Кај заштитените кабли секоја жила има т.н. *електрична заштита*. Електричната заштита се состои од тенок слој слабоспроводен материјал (на пример карбонизирана харија) поставен преку спроводникот и слој спроводен материјал кој што се поставува над изолацијата.

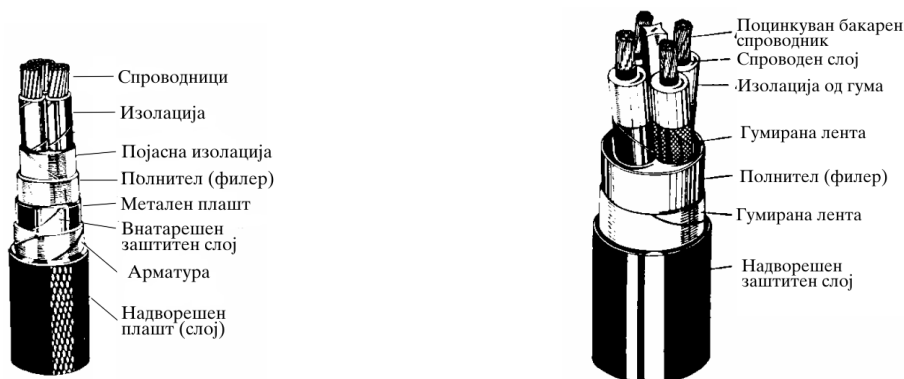
Внатрешниот плашт претставува безрабна цевка изработена од метал (олово, алуминиум, бакар или челик) или од термопластична маса (PVC, PE) односно еластомер (гума). Плаштот цврсто налегнува врз јадрото од кабелот и има задача да ја заштити изолацијата на кабелот од продор на влага и други штетни материи а истовремено го штити кабелот и од поблаги механички повреди.

Внатрешниот заштитен слој се поставува преку металниот плашт и има задача да го спречи можното триење помеѓу плаштот и арматурата на кабелот, а наоедно служи и како хемиска и термичка заштита на самиот плашт.

Арматурата е елемент од кабелската конрукција кој служи за заштита на кабелот од механички оштетувања и повреди до кои може да дојде поради надворешни удари, истегнување, свиткување на кабелот и слично. Има форма на оклоп, обвиткан околу кабелот, а се изработува од челични ленти или поцинкувани челични жици, а понекогаш се изработува од легиран бакар или легиран алуминиум.

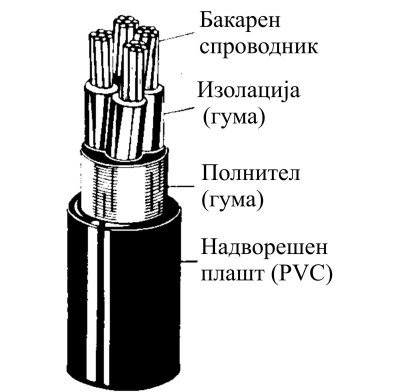
Надворешната заштита од корозија (**надворешниот плашт**) е елемент на кабелот кој има задача да го штити внатрешниот плашт и арматурата на кабелот од корозија и механички оштетувања. Кај неармираните кабли (кабли кои немаат челична арматура) тој се поставува директно преку металниот плашт, додека пак кај армираните кабли тој се поставува преку самата арматура на кабелот. Надворешниот плашт е последниот, завршен слој на кабелот.

На сликата 2.2 се прикажани конструкциите на некои почесто употребувани типови кабли. Во понатамошниот дел од текстот, ќе стане збор за секој елемент од конструкцијата на кабелот - одделно.

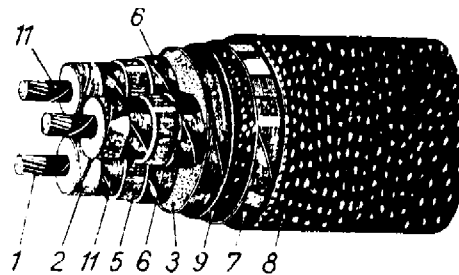


а) Појасен кабел тип IPO 13

б) 6 kV појасен кабел со изолација од гума



в) Кабел за низок напон (1 kV) тип PP 00 со изолација од PVC



г) 35 kV заштитен кабел тип IPHZO 13 со оловен плашт засебно за секоја жила

Легенда: 1) Спроводник 2) Изолација од хартија (IP) 3) Полнител 5) Оловен плашт 6) Импрегнирана хартија 7) Арматура од 2 чел. ленти 8) Импрегнирана јута 9) Јута 10) Арматура од челични жици 11) Метализирана хартија (екран)

Слика 2.2 Конструкција на разни типови кабли

2.2 СПРОВОДНИЦИ

Спроводниците се основен и единствен активен елемент на кабелот. Тие ја спроведуваат електричната струја и на тој начин кабелот ја извршува својата основна задача во рамките на ЕЕС. Сите останати елементи од кабелската конструкција се наменети да ги заштитат, т.е. да ги изолираат спроводниците од делувањето на околината во која е поставен кабелот, но и да ја изолираат самата околина од спроводниците кои се нормално под напон. Затоа, квалитетот на материјалот од кој се изработени спроводниците има првостепено значење за квалитетот на целиот кабел.

Спроводниците се изработуваат од *бакар* или *алуминиум*. Употребениот бакар односно алуминиум мора да има висок степен на чистота (примеси најмногу до 0,5%)¹ и по своите особини и својот состав да одговара на стандардите МКС Н.Ц0 015. Пресеците на спроводниците се стандардизирани и се искажуваат со големината на плоштината на напречниот пресек, изразена во mm². Според истите стандарди, кај на се стандардизирани следните номинални пресеци:

0,5 0,75 1 1,5 2,5 4 6 10 16 25 35 50 70 95 120 150 240 300 400 и 500 mm².

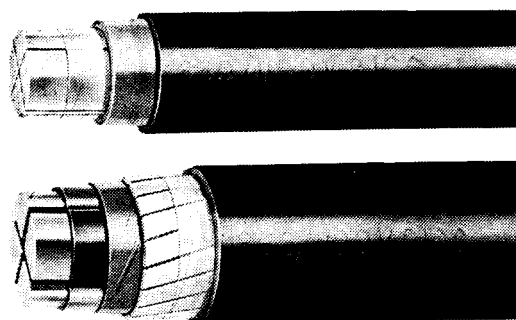
По обликот на својот пресек, спроводниците може да бидат со *кружен пресек*, со *секторски пресек* или пак со *кружен шуплив* (цевкаст) пресек, додека по начинот на изведбата, тие може да бидат едножични (полни) или повеќежични, составени од поголем број жици со кружен или правоаголен пресек, впредени во јаже (сл. 2.3).

Бројот на жици во повеќежичниот спроводник најчесто зависи од големината на пресекот на спроводникот. Вообичено е, спроводниците со пресек до 10 mm² да се изведуваат како полни, од една единствена жица со кружен пресек. Кај пресеците од 10 до 35 mm² се употребуваат и двете можности, додека спроводниците со пресек над 35 mm² најчесто се изведуваат како повеќежични (со исклучок на НН кабли од типот „Солидал“ (види сл. 2.4) кои имаат полни спроводници од алуминиум со секторски пресек и до 300 mm²). Во поглед на конструкцијата и начинот на изведбата на спроводниците, сè она што важеше за повеќежичните спроводници (јажиња) кај надземните водови, во принцип важи и овде, кај енергетските кабли.

¹ За електротехничкиот бакар не е важен хемискиот состав и количеството на примесите, туку неговата електрична спроводност, која при 20°C треба да биде најмалку 56 S·m/mm².

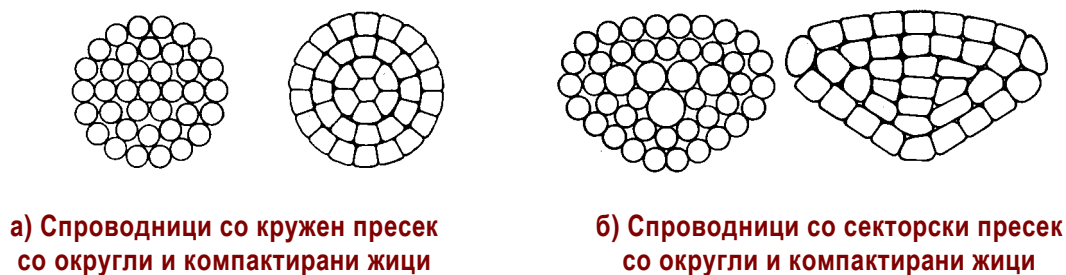


Слика 2.3 Форми и начини на изведба на спроводниците кај енергетските кабли



Слика 2.4 Солидал кабли со изолација од PVC и со спроводници кои имаат полн секторски пресек

Заради подобрување на факторот на пополнување и заради намалување на надворешните димензии, понекогаш одделните жици од повеќежичните спроводници пред впредувањето се провлекуваат низ специјални матици и се профилираат, а таквите спроводници се нарекуваат *компактирани спроводници* (слика 2.5).



Слика 2.5 Изглед на повеќежични спроводници со нормална и компактирана изведба

Кај каблите со високи и највисоки напони (110 kV и повеќе), заради големата дебелина на изолацијата основен проблем е ладењето на кабелот за време на погонот. Затоа, кај некои од нив, спроводниците се изведуваат во форма на шуплива цевка (сл. 2.3.в) бидејќи централната шуплина, низ која што перманентно струи изолациониот медиум (гас под притисок или изолационо масло под притисок) овозможува интензивно ладење на спроводникот. Истовремено, кај спроводниците со шуплив пресек се постигнува и подобро искористување на материјалот на спроводникот бидејќи појавата на скин ефект сега е слабо изразена.

2.3. ИЗОЛАЦИЈА

За изолирање на спроводниците одј енергетските кабли главно се користат следните материјали:

- хартија, импрегнирана со изолационо масло (за сите напони);
- поливинил-хлорид, за напони до 20 kV;
- термопластични маси (полиетилен, вмрежен полиетилен и слично) за сите напони до 500 kV;
- еластомери (природни или вештачки гуми), за напони до 35 kV.

2.3.1 Изолатија од импрегнирана хартија (IP, NP)

Хартијата е прв изолационен материјал кој бил употребуван не само кај каблите туку и кај останатите електроенергетски уреди. Нејзините извонредни изолациони својства прават и денес, кога технологијата нуди многу квалитетни изолациони материјали од вештачко потекло, хартијата и понатаму да биде на врвот меѓу употребуваните изолациони материјали, особено во доменот на високите и највисоките напони. Добрите особини на хартијата, употребена како изолација, се гледаат во: нејзината хемиска постојаност; зачувувањето на добрите електроизолациони особини и при високите работни температури (80°C); и како најважно, во ниската цена во споредба со цената на останатите изолациони материјали.

Кабелската хартија се произведува на база на натрон-целулозата, а основна суровина за нејзиното производство е дрвото. Се произведува во форма на ленти со широчина од 15 до 25 mm и дебелина од околу 0,1 mm. Со специјална постапка, во услови на вакуум, се отстранува практично сета влага содржана во хартијата. Потоа, добро исушената хартија, цврсто и хеликоидно се мота околу спроводникот во определен број слоеви, сè додека не се постигне потребната дебелина која пак од своја страна зависи од номиналниот напон на кабелот. Потоа, хартијата се импрегнира (натопува) со изолациона компаунд-маса со што се постигнува сите постојни шуплини во хартијата да се пополнат со изолационата маса, а самата хартија добива многу подобри електроизолациони особини.

За импрегнација на кабелската хартија се користат:

- нормална компаунд маса (ознака на изолацијата IP) изготвена на база на минерално масло и соодветни адитиви (додатоци);
- специјална компаунд-маса со зголемен вискозитет (ознака на изолацијата NP) која претставува мешавина од минерално масло, калофониум и восок и која останува во полуцврста состојба дури и при максималната работна температура на кабелот.

Обично, за импрегнација на хартијата се користи нормалната компаунд маса. Меѓутоа, во определени специфични услови, кога кабелот е поставен вертикално или пак косо и постои голема висинска разлика помеѓу неговите краеве (поголема од 10 m), се применува специјалната компаунд-маса, која има голем вискозитет. Со тоа се постигнува, миграцијата на компаундот (т.е. неговото цедење и движење низ кабелот) во услови кога е кабелот загреан, да биде многу мала па, дури и спречена.

Табела 2.1 Некои податоци за изолацијата од импрегнирана хартија

Физичка карактеристика	Изолација IP
Специфична маса $\gamma(\text{gr/cm}^3)$	0,8 - 1,0
Релативна диелектрична константа ϵ_r	2,5
Специфичен отпор ($\Omega\cdot\text{cm}$)	$10^{13} - 10^{14}$
Фактор на диелектрични загуби при 50 Hz $\text{tg } \delta$ (%)	0,8 - 1,0
Електрична пробојна цврстина (kV/mm)	45

Ориентационите вредности на некои поважни карактеристики на изолацијата од импрегнирана хартија се приложени во табелата 2.1.

2.3.2 Изолација од поливинил-хлорид (PVC)

Изолацијата од PVC се изведува како безрабен слој, рамномерно нанесен околу спроводникот. Поливинил-хлоридот е лесен за обработка, совитлив, не го подржува горењето, отпорен е на абење, не прима влага, отпорен е на хемиски влијанија на околината, а има и други добри особини. Во поглед на електроизолационите особини, изолацијата од PVC ги има следните недостатоци:

- има релативно мала пробојна цврстина;
- има висок фактор на диелектрични загуби $\text{tg } \delta$;
- хемиски е постојана само до температура од 70°C.

Поради споменатите слабости, поливинил-хлоридот како изолационен материјал се користи кај каблите со номинален напон до 10 kV (се користи, но ретко, и кај едножилните кабли за 20 kV напон), но затоа пак доминира со својата примена кај нисконапонските (НН) кабли (до 1 kV) и изолираните водови. Ориентационите вредности на некои поважни карактеристики на изолацијата од PVC се прикажани во табелата 2.2.

Табела 2.2 Некои податоци за изолацијата од PVC и PE

Физичка карактеристика	Изолација од PVC	Изолација од PE
Специфична маса $\gamma(\text{gr/cm}^3)$	1,4 – 1,5	0,8 – 1,0
Релативна диелектрична константа ϵ_r	3,0 – 4,0	2,3
Специфичен отпор ($\Omega\cdot\text{cm}$)	$10^{11} - 10^{12}$	10^{14}
Фактор на диел. загуби при 50 Hz $\text{tg } \delta$ (%)	2 – 10	0,04 – 0,05
Електрична пробојна цврстина (kV/mm)	8	40

2.3.3 Изолација од полиетилен (PE)

Како што се гледа од табелата 2.2, полиетиленот (PE) има значително подобри изолациони особини во однос на поливинил-хлоридот. Покрај високата диелектрична цврстина и малиот фактор на диелектрични загуби, тој е стабилен по својот хемиски состав дури и на температури над 100°C. Има голема механичка цврстина, отпорен е на

абење, отпорен е на температурни и хемиски влијанија и скоро воопшто не прима влага. Единствениот недостаток му е релативно високата цена. Заради сето тоа, полиетиленот се употребува кај каблите со низок, среден и висок напон (од 1 kV до 500 kV) макар што постојат тенденции неговата примена да се прошири и кај каблите со номинален напон над 500 kV.

2.3.4 Изолација од гума

Гумената изолација се употребува или како безрабен слој од гума, рамномерно нанесен околу спроводникот, или пак како обвивка формирана од гумени ленти, кои се мотаат хеликоидно околу спроводникот. Изолацијата може да биде изработена на база на:

- вулканизирана природна гума (која е мека и неотпорна на озонот и стареењето под дејство на електричното поле, поради што таа се употребува претежно кај НН кабли до 1 kV);
- вештачка (синтетичка) гума, (бутил-гума, неопрен, силиконска гума и др.), која е отпорна на стареење и на високите температури, а истовремено има и добри механички особини);
- мешавина од мека вулканизирана гума и вештачка гума.

Гумата е идеално совитлива и непропусна за водата, отпорна е на абење и на атмосферските влијанија, а има и други добри особини. Поради наведените добри особини, каблите со гумена изолација се користат во влажни простории, на отворено, во рудниците со подземен и површински коп како и во работилничките погони, претежно за напојување на подвижни машини и потрошувачи (преносни бушилки, преносни алати, земјоделски машини, рударски машини, дизалици, багери и слично). Гумата како електроизолационен материјал се употребува за напони до 10 kV, но нејзината примена е претежна кај НН кабли.

Во табелата 2.3 се прикажани ориентационите вредности на поважните карактеристики на гумата што се користи како изолационен материјал кај енергетските кабли.

Табела 2.3 Некои податоци за изолацијата од гума

Физичка карактеристика	Изолација гума (G)
Специфична маса $\gamma(\text{gr/cm}^3)$	0,9
Релативна диелектрична константа ϵ_r	2,3 - 2,7
Специфичен отпор ($\Omega\cdot\text{cm}$)	10^{14} - 10^{15}
Фактор на диел. загуби при 50 Hz $\text{tg } \delta$ (%)	0,2 - 0,3
Електрична пробојна цврстина (kV/mm)	20

2.4 ПЛАШТ (ВНАТРЕШЕН) НА КАБЕЛОТ

Внатрешниот плашт на кабелот претставува безрабна цевка изработена од метал (олово, алуминиум, бакар или челик) или термопластична маса (PVC, PE) која се поставува преку јадрото од кабелот и има задача да ги штити жилите од продорот на влага и други штетни хемиски материи. Истовремено, плаштот во извесна мера го штити кабелот и од полесни механички оштетувања.

Кај каблите со изолација од импрегнирана хартија, која е самата по себе мошне хигроскопна, редовно се употребува метален плашт, изработен од олово или алуминиум. Кај едножилните кабли, како и кај трижилните кабли со засебен метален плашт за секоја жила одделно, металниот плашт истовремено врши и обликување на електричното поле во изолацијата и му дава поволен - радијален облик, што е од особена важност кај каблите со напон над 10 kV.

Металниот плашт најчесто се изработува од олово. Чистото (рафинирано) олово е меко, лесно совитливо и пластично, и како такво лесно се формира во секаков облик. Меѓутоа, тоа е слабо отпорно на вибрациите кои предизвикуваат рекристализација и замор на материјалот, поради што, често пати, оловото се легира со бакар, калај и антимон и со тоа се зголемува неговата отпорност на вибрациите и корозијата. Кога се очекува кабелот да биде изложен на значителни вибрации (кабел положен на мост, под магистрален пат, под железничка пруга и слично) тогаш е препорачливо металниот плашт да биде изработен од алуминиум или бакар.

Алуминиумскиот плашт, слично како и оловниот, се изработува во форма на безрабна цевка. Цевката може да биде рамна или пак брановидна (заради зголемена совитливост). Алуминиумот е повеќе од 4 пати полесен од оловото ($\gamma_{Pb} = 11,34 \text{ gr/cm}^3$; $\gamma_{Al} = 2,70 \text{ gr/cm}^3$) поради што каблите со алуминиумски плашт се значително полесни од оние кои имаат оловен плашт. Алуминиумот е постојан и отпорен на вибрациите, има значително поголема механичка цврстина а има и поголема електрична спроводност. Поради својата голема електрична спроводност, често пати кај повеќежилните НН кабли алуминиумскиот плашт се користи како нулти односно заштитен спроводник.

Поради дефицитарноста на бакарот и неговата релативно високата цена², бакарот кај нас практично воопшто не се употребува како материјал за изработка на металните плаштови кај каблите.

Кај каблите чија изолација е доволно отпорна на впивање на влага (гума, термопластична маса), плаштот обично се прави од PVC- маса, полиетилен или гума. Плаштот изработен од PVC-маса е лесен, совитлив, отпорен на абење и на вибрации, отпорен е на хемиските влијанија и не го подржува горењето. Овие особини на поливинилхлоридот прават плаштот од PVC-маса да биде достоин заменик на металните плаштови. Гумените кабли, поради потребата од што е можно поголема совитливост, најчесто имаат плашт од вештачка гума (т.н. *неопрен*). Полиетиленот како материјал за изработка на плаштот обично се употребува кај каблите со изолација од PE, наменети за полагање во вода или во многу влажни почви.

2.5 ВНАТРЕШНА ЗАШТИТА ОД КОРОЗИЈА

Внатрешната заштита од корозија (внатрешната постелнина) има задача металниот плашт просторно да ги оддели од арматурата на кабелот со цел да го спречни нивниот непосреден контакт и можноста од триење. Истовремено таа претставува и заштита од корозија на внатрешниот дел од челичната арматура но и заштита на самиот плашт од температурното и хемиското влијание на околината во којашто е поставен кабелот. За изработка на внатрешната заштита, во основа се користат следните материјали:

² Кон крајот на 1995 година цената на бакарот на меѓународната берза изнесувал негде околу 3.800 USD/тон додека цената на алуминиумот беше двојно помала и изнесуваше околу 1.900 USD/тон.

- компаунд маса, катран, (битумен) во форма на премаз;
- импрегнирани хартиени ленти;
- гумени ленти;
- термопластични ленти од PVC;
- термопластичен плашт.

Во нормални услови, внатрешната антикорозивна заштита се изведува од импрегнирана хартија, хеликоидно намотана во неколку слоеви околу металниот плашт. За каблите кои се полагаат во изразито агресивни почви или во близина на водовите за електрична влеча, се применува специјална внатрешна заштита која се состои од две термопластични или гумени ленти кои на претходно премачканиот метален плашт со битумен, хеликоидно се намотуваат една преку друга.

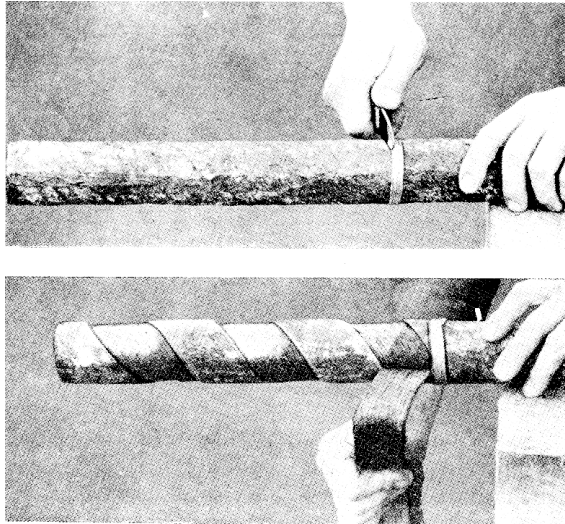
2.6 АРМАТУРА

Преку внатрешната заштита од корозија на кабелот се поставува оклоп, т.е. обвивка од челични ленти или челични жици која нема никаква електрична функција и служи единствено како заштита на кабелот од механички оштетувања.

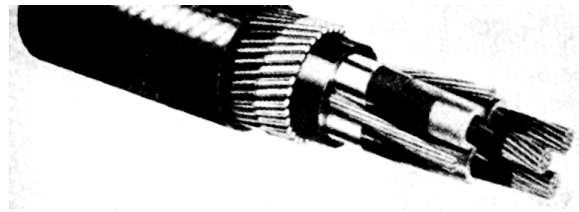
Каблите за кои се очекува дека ќе бидат изложени на нормални (вообичаени) механички напрегања имаат арматура од две челични ленти. Челичните ленти имаат широчина од неколку cm и дебелина од околу 0,5 mm. Заради заштита од корозија, лентите обично се премачкуваат од двете страни со компаунд маса, освен тогаш кога преку арматурата се поставува надворешен плашт од термопластична маса. Доколку пак кабелот е наменет за поставување во агресивни почви, тогаш лентите обично се штитат од корозија со поцинкување. Лентите спирално се обвиткуваат околу кабелот во форма на завојница, без преклопување, најнапред едната, а потоа и другата. Притоа, втората лента мора да ги покрива меѓупросторите оставени од првата лента, а самите меѓупростори не смеат да бидат поголеми од половина широчина на лентата. Лентите се обвиткуваат околу кабелот во лева насока – спротивно од насоката во која се впредени жилите во јадрото на кабелот.

Кога се очекува дека кабелот ќе биде изложен на зголемени механички напрегања (совивање или истегнување до кои обично доаѓа, на пример, при неговото полагање, при вовлекувањето на кабелот во цевки, канали, во рударски окна, при полагањето на каблите на коси терени, или пак кај подводните кабли кои се поставуваат на нерамно дно), арматурата тогаш се изведува од еден или два слоја поцинкувани челични жици. Челичните жици можат да имаат кружен (округли жици) или правоаголен (профилни жици) пресек. Округлите жици обично имаат пречник од 1,5 до 3,0 mm, додека дебелината на профилираните жици обично изнесува од 1,0 до 1,5 mm.

Челичните жици хеликоидно и густо се мотаат околу кабелот на тој начин што рамномерно и целосно ја покриваат сета негова површина. Кога арматурата се состои само од еден слој жици, жиците се мотаат во насока спротивна од насоката на впредувањето на жилите од кабелот. Доколку пак арматурата се состои од два слоја жици, тогаш надворешниот слој се мота во насока спротивна од насоката на мотање на внатрешниот слој. Кога кабелот нема надворешна антикорозивна заштита (надворешен плашт) или кога надворешниот плашт е изработен иод термопластична маса, обично преку арматурата од челични жици се намотува (спирално и без преклопување) челична поцинкувана лента со помала дебелина.



а) Енергетски кабел со арматура (механичка заштита) од челични ленти



б) Подморски кабел со арматура (механичка заштита) од челични жици со кружен пресек

Слика 2.5 Енергетски кабли со разни видови механичка заштита

Повеќежилните кабли кои имаат метален плашт изработен од алуминиум, бакар или челик, понекогаш се изведуваат и без челична арматура бидејќи самиот метален плашт донекаде може да пружи извесна механичка заштита. Едножилните кабли за наизменична струја, по правило, немаат челична арматура бидејќи во неа би се индуцирале вртложни струи кои би предизвикувале додатно загревање на кабелот и додатни активни загуби. Сепак, кога едножилните кабли мораат да имаат механичка заштита, таа тогаш се изработува од немагнетен материјал или пак се изработува во форма на отворени челични спирали. Понекогаш се применуваат и челични жици, комбинирани со извесен број симетрично разместени жици од немагнетски материјал, или пак сите жици се изработуваат од алуминиумски легури кои имаат зголемена механичка отпорност.

2.7 НАДВОРЕШНА ЗАШТИТА ОД КОРОЗИЈА

Надворешната заштита од корозија (која уште се нарекува и надворешен плашт) е последниот (завршен) слој од кабелската конструкција којшто се поставува преку арматурата на кабелот. Доколку кабелот нема челична арматура, тогаш надворешниот плашт се поставува директно преку металниот плашт. Тој има задача да ја заштити арматурата и останатите делови на кабелот од корозијата и другите штетни хемиски влијанија на околината во која што е тој поставен. Се изработува најчесто од неколку слоја различни материјали кои се мачкаат или намотуваат околу арматурата. Како материјали за таа намена се користат:

- премази од компаунд маса (битумен, катран, асфалт);
- обвивка од импрегнирана хартија или јута;
- обвивка изведена од термопластични ленти;
- плашт од термопластична маса (PVC или PE);
- плашт од еластомер (гума).

Бројот и составот на слоевите од кои е изведена надворешната заштита од корозија зависи од тоа дали е кабелот армиран или не.

Надворешната заштита на неармираните кабли со оловен плашт најчесто го има следниот состав: премаз од битумен, неколку слоеви импрегнирана хартија, премаз од битумен, слој импрегнирана јута, премаз од битумен и премаз од нелеплив слој мрсна боја. Последниот слој мрсна боја го спречува лепењето на кабелот со макарата (баранот) на која е тој намотан, а го спречува и меѓусебното лепење на навивките од кабелот. Вкупната дебелина на надворешниот заштитен слој од корозија изнесува од 2,0 до 2,5 mm. Во последно време, неармираните кабли со оловен плашт имаат надворешна заштита од корозија која се состои само од премаз со битумен и од PVC- плашт чија дебелина изнесува од 2,0 до 4,0 mm, зависно од надворешниот пречник на кабелот.

Неармираните кабли со алуминиумски плашт имаат надворешна заштита од корозија со следниот состав: премаз од битумен, неколку слоеви намотана термопластична лента и PVC-плашт или импрегнирана јута.

Неармираните кабли со плашт од PVC, PE или гума немаат потреба од надворешна заштита од корозија бидејќи самиот плашт е доволно отпорен на сите хемиски влијанија на околната средина.

Армираните кабли со метален плашт од олово или алуминиум имаат надворешна антикорозивна заштита со следниот состав: премаз од битумен, обвивка од импрегнирана јута или импрегниран хесијан (vlakнеста материја), премаз од битумен и премаз од мрсна нелеплива боја. Во последно време, армираните кабли со метален плашт, како надворешна заштита од корозија добиваат само плашт од термопластична маса. Армираните кабли со плашт од термопластична маса, исто така, најчесто имаат надворешен плашт од термопластична маса кој служи за заштита од корозија на челичната арматура.

2.8 ЕЛЕКТРИЧНА ЗАШТИТА

Електричната изолација што се употребува во кабелската техника нема иста диелектрична цврстина во сите правци. Притоа, нејзината цврстина во радијален правец може да биде поголема од цврстината во тангенцијален или аксијален правец. Оваа особина ја имаат практично сите врсти изолација, но тоа првенствено се однесува на изолацијата од импрегнирана хартија. Затоа, обликот на електричното поле што владее во изолацијата има големо значење на карактеристиките на кабелот, не само во поглед на неговата пробојна цврстина, од која зависи номиналниот напон на кабелот, туку и во поглед на дозволената струјна оптоварливост, која пак е зависна од дебелината на изолациониот слој, т.е. од условите на ладење на спроводниците и друго.

Обликот на електричното поле првенствено зависи од конструкцијата на кабелот (слика 2.6). Во таа смисла, каблите ги делиме во три основни групи:

- кабли без метален плашт (слика 2.6.a – лево);
- повеќежилни кабли со заеднички метален плашт (на пример појасни кабли) (сл. 2.6.a – десно);
- кабли со метален плашт или кабли со метален екран околу секоја жила (заштитени кабли, слика 2.6.б).



Слика 2.6 Различни облици на електричното поле кај енергетските кабли

Доколку кабелот нема метален плашт или пак има еден заеднички метален плашт, тогаш обликот на електричното поле во внатрешноста на плаштот ќе има изглед како на сликата 2.6.а. Кај каблите со засебно оплаштени жили (секоја жила има сопствен метален плашт), како и кај каблите кои поседуваат електрична заштита (екран), електричното поле во изолацијата има чисто радијален облик, како што е тоа прикажано на сликата 2.6.б. Во чест на пронаоѓачот на електричната заштита, Германецот Хохштетер (*Hochstädter*), последниот тип кабли се познати уште и Хохштетер – кабли или **Н-кабли**.

Поради претходно наведените проблеми со обликот на електричното поле, каблите со номинален напон 20 kV и повеќе, по правило, се изведуваат како заштитени. Заштитата се состои од:

- слој слабоспроводен материјал (обично тоа е карбонизирана хартија) кој се поставува преку спроводникот и има задача да го хомогенизира („испегла“) електричното поле на површината од спроводникот, бидејќи спроводникот поради својата повеќежична структура има нерамна површина;
- слој од спроводен материјал кој се поставува преку самата изолација на жилата.

Надворешниот слој од електричната заштита што се поставува преку изолацијата кај Н-кабли најчесто се изработува од тенка метална фолија направена од немагнетен материјал или пак од метализирана хартија. Кога кабелот е едножилен или пак е изведен со засебно оплаштени жили, надворешниот слој од електричната заштита може да биде изведен и од карбонизирана хартија или од сличен слабоспроводен материјал.

3 ОЗНАЧУВАЊЕ НА КАБЛИТЕ

Под означување на каблите подразбираме доделување ознака на секој вид кабел. Ознаката претставува множество од букви и бројки кои ќе ни овозможат сосема лесно, прецизно и еднозначно да го препознаеме типот на кабелот и неговите поважни конструктивни особености. Со ознаката обично се опишани следните конструктивни елементи на кабелот:

- материјалот од којшто е изработена изолацијата;
- материјалот од којшто е изработен внатрешниот плашт;
- материјалот од којшто се изработени спроводниците како и нивниот облик;
- бројот на жилите и нивниот пресек;
- номиналниот напон на кабелот и друго.

Понекогаш, со бојата на надворешниот плашт и со бојата на изолацијата на жилите се даваат дополнителни информации за намената на кабелот, местото на употреба и намената на самите жили (фазен спроводник, неутрален спроводник или заштитен спроводник). Кај нас означувањето со бојата се применува само кај изолираните водови и енергетските кабли со напон до 1 kV.

Нашиот стандард МКС Н.ЦО. 006 прецизно го опишува начинот на означувањето на енергетските кабли а примената на овие ознаки кај нас е задолжителна во сета преписка и техничка документација. Ознаката на енергетските кабли според овој стандард се состои од следните 5 групи симболи:

- 1 група буквени симболи за типот на изолацијата и типот на внатрешниот плашт;
- 2 група од два нумерички симбола со кои е опишана конструкцијата на кабелот (или поточно речено видот на заштитната арматура и надворешниот заштитен слој);
- 3 група буквени симболи со кои е опишана врстата на материјалот и обликот на напречниот пресек на спроводниците на кабелот;
- 4 група симболи со кои се даваат податоци за бројот на спроводниците (жилите) и нивниот номинален напречен пресек;
- 5 група симболи со кои се даваат податоци за номиналниот напон на кабелот.

Помеѓу секои две соседни групи симболи во ознаката според МКС, се остава по едно празно место.

3.1 ОЗНАЧУВАЊЕ НА МАТЕРИЈАЛОТ ЗА ИЗОЛАЦИЈАТА И ВНАТРЕШНИОТ ПЛАШТ

Првата група буквени симболи служи за обележување на двете најважни особености на кабелот – материјалот од којшто е изработена изолацијата на жилите и материјалот од којшто е изработен внатрешниот плашт. Овде ќе бидат наведени само поважните стандардизирани ознаки што се користат за таа намена:

- P – поливинил-хлорид (PVC);
- G – гума (природна или на база на вештачки каучук);
- E – термопластичен полиетилен;
- X – вмрежен полиетилен (термостабилен полиетилен);

- IP – импрегнирана хартија;
- NP – особено импрегнирана хартија;
- B – бутил гума;
- S – силиконска гума;
- N – неопрен (полихлоропрен);
- EP – етил-пропилен;
- EV – поливинил-ацетат.
- A – внатрешен плашт од алуминиум;
- AV – внатрешен плашт од брановиден алуминиум;
- AZ – внатрешен плашт од заварени алуминиумски ленти;
- O – внатрешен плашт од олово;
- ZO – плашт од олово за секоја жила одделно;
- H – заштитен кабел (присуство на електрична заштита-екран).

3.2 ОЗНАЧУВАЊЕ НА КОНСТРУКЦИЈАТА НА КАБЕЛОТ

Видот на употребената механичка заштита (арматура) и начинот на изведбата на надворешната заштита од корозија се опишани со втората група бројчани симболи. Таа се состои од две бројки, а самите бројчани симболи се поделени на декади. Секоја декада се однесува на подмножество кабли со заеднички белези на конструкцијата, при што, во принцип, првата бројка од декадата се однесува на употребената механичка заштита, додека втората бројка од декадата на извесен начин ја опишува надворешната заштита од корозија.

Во табелата 3.1. се прикажани конструктивните особини на некои типови енергетски кабли како и начинот на означување на втората група симболи. Оваа табела не е комплетна бидејќи таа ги содржи конструктивните особености само на некои декади, предвидени со МКС–стандардите. Заедничките белези на останатите типови кабли коишто не се опфатени со табелата 3.1 се следните:

- декадата 40 – 49 означува дека кабелот има надворешен плашт од термопластична маса под кој се наоѓаат елементи на заштита (механичка и електрична);
- декадата 50 – 59 означува дека кабелот има надворешен плашт од еластомер (природна или синтетичка гума) под кој се наоѓаат елементи на заштита;
- декадата 60 – 65 означува дека надворешниот плашт на кабелот е еластомер и дека кабелот содржи заштитни, командни или сигнални спроводници;
- декадата 70 – 79 означува дека кабелот има надворешен плашт од зајакнат еластомер под кој се наоѓаат елементи на заштита;
- декадата 80 – 87 означува дека кабелот има надворешен плашт од термопластичен материјал или еластомер под кој има електрична заштита;
- декадата 90 – 91 означува дека кабелот има надворешен плашт од термопластичен материјал преку кој има електрична заштита.

Дополнителни, многу подетални информации за конструкцијата на овие кабли можат да се најдат во соодветната стручна литература (нпр. [1], [2], [3]).

Табела 3.1 Бројни симболи од втората група во ознаката на енергетските кабли и нивно значење

Механичка заштита (МЗ) и заштита од корозија (ЗК)		Бројчани (нумерички) симболи поделени по декади																																							
		01	02	03	04	10	11	12	13	14	20	21	22	23	24	25	26	27	28	30	31	32	33	34	35																
МЗ	1. Обвивка од 2 челични ленти					+	+	+	+	+																															
	2. Обвивка од профилирани челични жици											+	+	+	+	+	+			+																					
	3. Обвивка од профилирани челични жици																				+	+	+	+	+	+															
	4. Завојница од профилирани челични жици																	+																			+				
	5. Два слоја профилирани челични жици																																					+	+		
	6. Завојница од челична лента																																					+			+
ЗК	1. Импрегнирана јута	+								+																													+		
	2. Импрегнирано текстилно предиво		+							+																															
	3. Надворешен плашт од PE				+																																				
	4. Надворешен плашт од PVC					+																																		+	+
	5. Премаз од битумен									+																															
	6. Незапаллив премаз																																							+	

3.3 ОЗНАЧУВАЊЕ НА МАТЕРИЈАЛОТ И ОБЛИКОТ НА СПРОВОДНИЦИТЕ

Третата група симболи во ознаката на кабелот дава информација за материјалот од кој се направени спроводниците, обликот на нивниот напречен пресек и начинот на нивната изведба.

Вообичаено е спроводниците кај енергетските кабли да се изработуваат од бакар и да имаат кружен пресек. Во тој случај, третата група симболи не содржи никаков знак и таа се испушта од ознаката на кабелот. Доколку пак спроводниците не се од бакар или пак имаат напречен пресек со поинаква форма од круг, тогаш тоа се означува со определена ознака во третата група симболи. За таа цел, во оваа група симболи се користат следните ознаки:

A – спроводници од алуминиум;

S – повеќежични спроводници со секторски пресек;

SJ – едножични (масивни) спроводници со секторски пресек.

3.4 ОЗНАЧУВАЊЕ НА БРОЈОТ НА ЖИЛИ И НИВНИОТ НОМИНАЛЕН ПРЕСЕК

Бројот на жилите во кабелот и нивниот номинален пресек се означува со група симболи кои припаѓаат на четвртата група симболи. Ознаката се состои од најмногу три броја. Во неа, покрај бројката со која се означува бројот на жили во кабелот, се

содржи и бројката со која се означува номиналниот пресек на жилите, изразен во mm^2 . Доколку една од жилите има спроводник со помал попречен пресек во однос на останатите жили од кабелот, тогаш тоа посебно се означува со трета бројка. Така на пример, ознаката:

$$3 \times 35$$

означува дека кабелот има три жили и секоја од нив има номинален попречен пресек 35 mm^2 , додека ознаката

$$3 \times 35 + 16$$

означува дека покрај трите жили со по 35 mm^2 , кабелот содржи уште една жила која има номинален пресек 16 mm^2 .

3.5 ОЗНАЧУВАЊЕ НА НОМИНАЛНИОТ НАПОН НА КАБЕЛОТ

Последната група симболи ја содржи информацијата за висината на номиналниот напон за кој е граден кабелот. Напонот се изразува во киловолти (kV), а ознаката kV се пишува задолжително на крајот на оваа група симболи. Кај повеќежилните кабли разликуваме две врсти номинален напон: номинален напон помеѓу било кои два спроводника U_0 и номинален напон помеѓу било кој спроводник и земјата U_0 . Во тој случај, во ознаката на кабелот се пишуваат и двата номинални напони, одделени меѓусебе со коса црта, во форма:

$$U_0/U \text{ kV} .$$

3.6 ПРИМЕРИ ЗА ОЗНАЧУВАЊЕ НА КАБЛИ

За илустрација на она што беше досега кажано во врска со означувањето на енергетските кабли, ќе се послужиме со следните примери:

- а) Ознаката IPO 13 3×150 6/10 kV означува кабел со следните карактеристики:
- изолацијата на кабелот е импрегнирана хартија;
 - кабелот има внатрешен метален плашт од олово;
 - кабелот има механичка заштита (арматура) составена од две челични ленти;
 - надворешната заштита од корозија се состои од повеќе слоеви импрегнирана хартија и слој јута, импрегнирана со битумен;
 - кабелот има три бакарни спроводници, секој со кружен пресек и со номинален напречен пресек 150 mm^2 ;
 - номиналниот напон помеѓу било кој спроводник и земјата изнесува 6, а помеѓу спроводниците 10 kV.
- б) Ознаката PP 41 $3 \times 35 + 16$ 0,6/1 kV означува кабел со:
- изолација од PVC;
 - внатрешен плашт од PVC;
 - механичка заштита (арматура) изведена од две челични ленти;
 - надворешен плашт од термопластична маса;

- вкупниот број на жили е 4, од кои три со пресек од по 35 mm² и една со номинален попречен пресек од 16 mm²;
 - номинален напон 0,6 kV (фазен) односно 1 kV (меѓуфазен).
- в) Означата XHP 48 А 1×95/16 12/20 kV означува кабел со:
- изолација од умрежен полиетилен;
 - присуство на електрична заштита која се состои од слабоспроводен слој под и врз изолацијата и екран во вид на обвивка од метални жици и ленти, намотани околу жилата;
 - внатрешен плашт од PVC-маса;
 - спроводник од алуминиум со кружен напречен пресек;
 - номиналниот напречен пресек на спроводникот изнесува 95 mm², а на електричната заштита (екранот) 16 mm²;
 - номинален напон 12 kV (фазен) односно 20 kV (меѓуфазен).
- г) Означата IPZO 13 3×120 20/35 kV означува кабел со:
- изолација од импрегнирана хартија;
 - метален плашт од олово околу секоја жила (трооловен кабел);
 - арматура од округли поцинкувани челични жици;
 - надворешна антикорозивна заштита од импрегнирана хартија и импрегнирана јута, премачкана со битумен;
 - три бакарни жили со кружен пресек од по 120 mm²;
 - номиналниот напон на кабелот изнесува 20/35 kV.

4 ТИПИЧНИ ВИДОВИ КАБЛИ И ПОДРАЧЈА НА НИВНАТА ПРИМЕНА

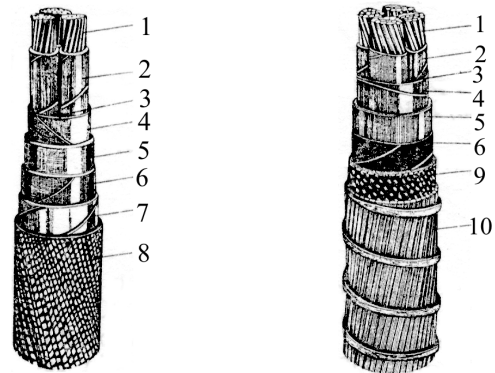
4.1 КАБЛИ СО ИЗОЛАЦИЈА ОД ИМПРЕГНИРАНА ХАРТИЈА И МЕТАЛЕН ПЛАШТ

Овие кабли се произведуваат за напони од 1 до 60 kV. Во зависност од применетиот тип механичка заштита и во зависност од начинот на изработката, се применуваат за хоризонтално, косо и вертикално полагање. Се положуваат на отворен простор, во затворени простории, директно во земјата, во кабелски канали, под вода, во рудници и на други места. Според конструкцијата и начинот на изработката се делат на:

- појасни кабли (за напони до 10 kV);
- заштитени Н-кабли (за напони до 20 kV);
- заштитени кабли со 3 метални плашта (за напони до 60 kV);
- едножилни кабли (за напони до 60 kV).

4.1.1 Појасни кабли

Жилите кај овие кабли се изведени од бакарни или алуминиумови спроводници, изолирани со импрегнирана хартија. Жилите, заедно со пополнувањето (жили од хартија или јута) меѓусебно се впредуваат. Над впредените жили се намотува заедничка изолација од импрегнирана хартија, која се нарекува *појасна изолација*. Врз така формираното „јадро“ од кабелот, се поставуваат: металниот плашт, внатрешната заштита од корозија, челичната арматура и надворешната заштита од корозија (сл.4.1 а). Се изработуваат за напони до 10 kV.



Слика 4.1 а Појасни кабли, тип IRO 13 (лево) и тип IRO 31 (десно)

4.1.2 Заштитени (екранизирани) кабли

Поради нерадијалниот карактер на електричното поле, појасните кабли не се произведуваат за напони над 10 kV. Кај заштитените Н-кабли, со помош на слабоспроводниот слој под и над изолацијата и со помош на екранот (метализирана хартија) кој се поставува преку изолацијата од IP, се постигнува симетричност, т.е. радијалност на електричното поле а со тоа и повишување на пробјојниот напон на кабелот. Екранизираните жили се впредуваат, заедно со пополнувањето, а потоа се обмотуваат со метална фолија или пак со памучна лента која е проткаена со тенки бакарни жички. Имаат ознака IPHO или NPHO и се произведуваат за напони до 20 kV (слика 4.1.б - лево).



б) Трижилен Н-кабел со заеднички метален плашт, тип IPHO 13 (лево) и заштитен кабел со оловен плашт за секоја жила засебно, тип IPZO 13 (десно)

Легенда: 1. Спроводник 2. Изолација од хартија 3. Пополнување 4. Појасна изолација 5. Оловен плашт 6. Импрегнирана хартија 7. Арматура од две челични ленти 8. Импрегнирана јута 9. Импрегнирана јута 10. Арматура од челични жици 11. Метализирана хартија (екран) 12. Платно проткаено со бакарна жица.

Слика 4.1.6 Заштитени Н–кабли со изолација од хартија и метален (оловен) плашт

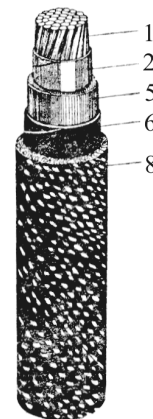
4.1.3 Заштитени кабли со три метални плашта

Кај овие кабли секоја жила има засебен метален плашт. На тој начин радијалната структура на електричното поле во изолацијата од секоја жила на кабелот се постигнува со помош на самиот метален плашт (сл. 4.1 б – десно). Над металниот плашт се нанесува слој импрегнирана хартија. Така формираниите жили се впредуваат и се добива јадрото на кабелот. Над јадрото се поставува заедничка механичка заштита (челична арматура) и надворешна заштита од корозија. Се изработуваат за напони до 60 kV.

4.1.4 Едножилни кабли

И кај едножилните кабли електричното поле во изолацијата има чисто радијална структура. Тоа овозможува овие кабли исто така да се произведуваат за напони до 60 kV. Во последно време едножилните кабли сè повеќе ги истиснуваат појасните кабли од следните причини:

- поради потенциот изолационен слој, тие имаат за околу 20% поголемо дозволено струјно оптоварување;
- лесно и брзо се монтираат;
- лесно и брзо се поправаат;
- со поставување на четврт, резервен едножилен кабел, се постигнува ефикасна и ефтина резерва за случај на дефект на една од жилите на кабелскиот вод.



Слика 4.1 в Едножилен кабел тип IPO 01

Го имаат недостатокот што поради додатните загуби од вртложните струи предизвикани од наизменичното магнетско поле, не смеат да имаат челична арматура. Затоа, тие се прават без челична арматура, или пак со арматура од немагнетски материјал (легура на база на алуминиум) (сл. 4.1 в).

4.1.5 Подрачје на примена и место на полагање на каблите со изолација од импрегнирана хартија

Во табелата 4.1 е прикажано подрачјето на примена типичните и почесто употребуваните типови кабли со изолација IP и со метален плашт. Во неа, како и во табелата 4.2, подрачјата на употреба на каблите се означени со буквите А, Б, В, Г и Д, и тие го имаат следното значење:

- А во суви простории и во кабелски канали;
- Б во земја, каде што не постои опасност од механички оштетувања, како и во воздух, во влажна и хемиски агресивна атмосфера;
- В на места каде што постои можност за механички напрегања и оштетувања;
- Г во изразито хемиски агресивна атмосфера и онаму каде што постои опасност од пожар;
- Д онаму каде што постои опасност од појава на големи механички напрегања на истегнување на кабелот (косо и вертикално полагање).

Табела 4.1 Подрачје на примена на кабли со изолација IP и со оловен плашт

Ознака	Конструкција на кабелот	Механичка заштита и надв. зашт. од корозија	Број на жили	Пресек mm ²	Ном. напон kV	Подр. на примена
IP00	/	/	/	/	/	А
IP01	/	Импрегнирана јута	1	4 - 1000	1	Б, В
IP011	Две челични ленти	Антикорозивен премаз	1, 2, 3, 4	4 - 1000	1, 3, 6, 10	А, В
IP013	Две челични ленти	Импрегнирана јута	1, 2, 3, 4	2,5 - 400	1, 3, 6, 10	А, Б, В
IP014	Две челични ленти	PVC - плашт	1, 2, 3, 4	10 - 300	10	А, Б, В, Г
IP021	Челични жици и челична лента (завојница)	/	3, 4, 3/1	1,5 - 240	1, 3, 6, 10	А, В, Д
IP023	Поцинкувани чел. жици	Импрегнирана јута	3, 4	6 - 240	1, 3, 6, 10	А, Б, В, Д
IP031	Поцинкувани проф. чел. жици и челична завојница	/	3, 4	6 - 400	1, 3, 6, 10	А, В, Д
IP033	Поцинк. профилни чел. жици	Импрегнирана јута	3, 4	25 - 400	1, 3, 6, 10	А, Б, В, Д
IP035	Поцинк. профилни чел. жици	Импрегнирана јута	3	10 - 300	1, 3, 6, 10	А,Б,В,Г,Д
IPZO 13	Две челични ленти	Импрегнирана јута	3	35 - 400	35, 60	А, Б, В

4.2 КАБЛИ СО ИЗОЛАЦИЈА И ПЛАШТ ОД ТЕРМОПЛАСТИЧНА МАСА

Како материјал за изработка на изолацијата кај овие кабли се употребуваат поливинил-хлоридот (PVC) и полиетиленот (PE). PVC – масата во споредба со полиетиленот е поевтина, но има помала диелектрична цврстина и значително повисок фактор на диелектрични загуби $tg \delta$. Затоа, PVC како изолација на спроводниците најчесто се употребува за каблите со напон до 1 kV. Тој овозможува загревање на спроводниците до 70°C. Постојат PVC-маси кои се механички постојани и при многу ниски температури (-40°C). Во поглед на подрачјето на примена и местата на полагање, каблите со изолација од PVC-маса се доста слични на оние со изолација IP.

Полиетиленот како изолационен материјал има значително подобри електрички па и механички својства во однос на PVC–масата. Се одликува со многу мали диелектрични загуби (околу 600 пати помали во однос на PVC–масата), висока диелектрична цврстина на пробој, блиска до цврстината на изолацијата, постојаност спрема влагата и голема механичка цврстина. Со специјална постапка во текот на производството на полиетиленот, наречена „вмрежување“, се добива *вмрежениот полиетилен* кој има уште подобри електроизолациони особини од обичниот полиетилен, а истовремено дозволената работна температура кај него изнесува 90 °C. Поради тоа, струјната оптоварливост на овие кабли е за околу 30% поголема од истата кај каблите со изолација IP. Се употребуваат за напони до 400 kV.

Во поглед на конструкцијата на каблите со изолација од PVC или PE, може да се каже следното. Овие кабли се произведуваат претежно како 4-жилни, за напон до 1 kV, како 3-жилни за напони до 10 kV и како 1-жилни за напони над 10 kV. Спроводниците се изолираат со безрабен слој (обвивка) од PVC или PE маса. Секторскиот пресек на спроводниците доминира кај каблите за низок напон (до 1 kV) а се применува и кај каблите со номинален напон 3 и 6 kV. За повисоките напони се користат исклучиво спроводници со кружен пресек.

Жилите заедно со пополнувањето од гума или PVC-маса со послаб квалитет се впредуваат и го формираат јадрото на кабелот.

Кај НН кабли покрај трите фазни спроводници често пати се среќава и уште еден спроводник кој има форма на шуплива цевка. Таа концентрично го опфаќа јадрото поради што е наречена *концентричен спроводник*. Концентричниот спроводник се употребува првенствено како нулти (неутрален) спроводник или пак како заштитен спроводник. Покрај функцијата на нулти, односно заштитен спроводник, тој истовремено служи и како електрична заштита од преголем напон на допир до кој може да дојде при настанување на куса врска во кабелот (електричен пробој на изолацијата или физички спој на фазните спроводници поради механички повреди). Концентричниот спроводник (заради флексибилност на целиот кабел) се изработува најчесто од бакарни жици со кружен или правоаголен облик, а неговиот пресек е еднаков или е нешто помал од пресекот на фазните спроводници.

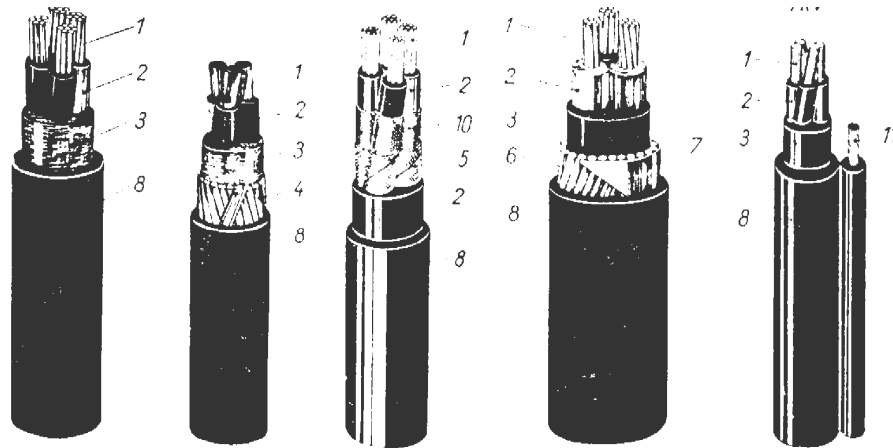
Кај каблите со номинален напон над 1 kV примената на електричната заштита од превисок напон на допир е обврзна. Таа се изведува во форма на спирална обвивка од метални ленти кои се поставуваат околу секоја жила одделно или пак се поставува преку јадрото од кабелот. Понекогаш, челичната арматура кај овие кабли исто така може да ја преземе улогата на електричната заштита од превисок напон на допир. За таа цел, нејзината електрична спроводност мора да биде најмалку еднаква на електричната спроводност што ја има бакарен спроводник со напречен пресек 6 mm^2 , или како што се вели, нејзиниот еквивалентен пресек треба да изнесува најмалку 6 mm^2 - бакар.

Каблите со номинален напон над 6 kV се изведуваат како заштитени (Н-кабли). Кај нив, под и над изолацијата од секоја жила се поставува слабоспроводен слој со што се постигнува радијалност на електричното поле во самата изолација. Арматурата кај сите видови кабли (доколку ја има) е по состав и по конструкција иста со арматурата што се применува кај каблите со изолација IP.

Плаштот кај овие кабли се изведува во форма на безрабна цевка изработена од специјална PVC–маса со голема механичка цврстина која се поставува директно над арматурата односно над концентричниот спроводник.

Кабелот од сликата 4.2.д е таканаречениот самоносив кабел. Тој претставува извесен премин (т.е. преодна форма) меѓу надземните и кабелските водови, бидејќи се

поставува да виси во воздухот, закачен за специјални носечки конструкции (што е одлика на надземните водови) а во исто време, околу секоја жила постои изолационен слој од PVC-материја или вмрежен полиетилен (XLPE) (што е одлика на кабелските водови). Заради механичко растоварување на спроводниците, самоносивиот кабел содржи специјално челично јаже со пречник 4 – 5 mm, кое се прицврстува за носечките конструкции што се поставени долж неговата траса, така што спроводниците скоро воопшто не се затегнати. Се употребува во НН мрежи (до 1 kV) на градските, приградските и туристичките населби (од естетски причини), а често се употребува за надземни куќни приклучоци. По потреба, може да се полага и во земја, а се изработува за пресеци од 4 до 50 mm².



а) PP00 1 kV б) PP40 1 kV в) PP 48 6-20 kV г) PP44 до 10 kV д) PP 00/0 1 kV

Легенда: 1. Спроводник 2. Изолација од PVC (PE) 3. Пополнување 4. Заеднички нулти концентричен спроводник : 5. Електрична заштита од Си-лента 6. Арматура од округла челична жица 7. Спирала (завојница) од челична лента; 8. PVC-плашт 9. Арматура од плосната челична жица 10. Слабоспроводен слој 11. Челично јаже (носечко).

Слика 4.2 Кабли со изолација и плашт од термопластична маса

Каблите со изолација и со плашт од термопластични материјали се одликуваат со следните особини:

- отпорни се на механички вибрации (што не беше случај и со каблите кои имаат оловен плашт);
- значително се полесни од каблите со оловен плашт;
- проблемот со миграција и цедење на кабелското масло (импрегнантот на хартијата) кој е присутен кај каблите со изолација IP овде не постои;
- отпорни се на сите хемиски влијанија и не подржуваат горење;
- поради својата еластичност и лесна советливост, лесно се полагаат;
- едноставни се за одржување и поправки.

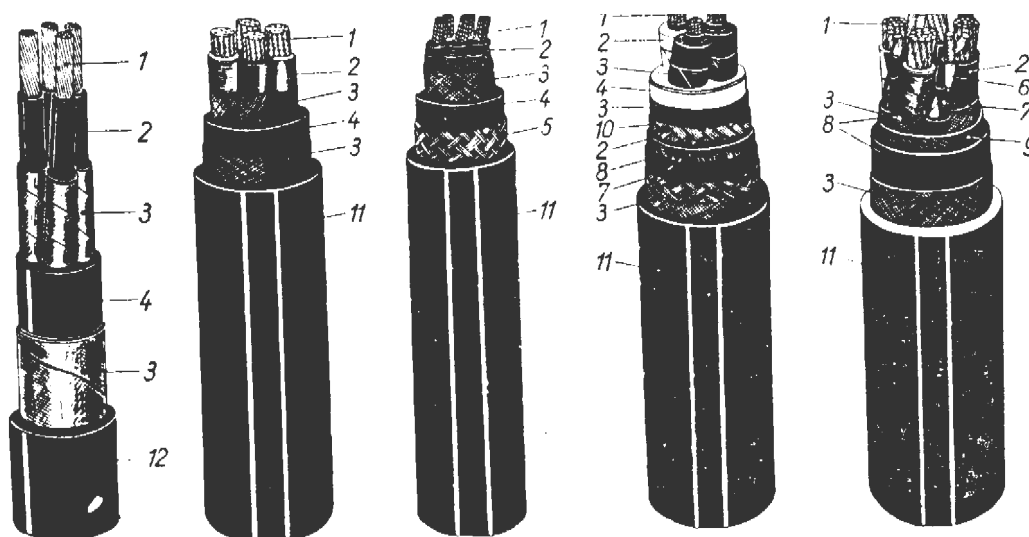
Табела 4.2 Подрачје на примена и место на полагање на каблите со изолација и плашт од PVC-маса

Ознака на кабелот	Конструкција на кабелот (мех. и електрична заштита)	Број на жили	Ном. пресек mm ²	Ном. напон kV	Подрачје на примена
PP 00	/	1, 2, 3, 4	1,5 - 500	1	А, Б, Г
PP 40	Концентричен спров. од Си жици и ленти	2, 3, 3/1	1,5 - 300	1	А, Б, Г
PP 41	Арматура од две челични ленти	1, 2, 3, 4	1,5 - 300	1 - 10	А, Б, В, Г
PP 44	Арматура од поц. чел. жици и завојници од ленти	1, 2, 3, 4	1,5 - 400	1, 6, 10	А, Б, В, Г, Д
PP 45	Арматура од поц. чел. жици и завојници од ленти	1, 2, 3, 4	4 - 400	1, 6, 10	А, Б, В, Г, Д
PP 48, PNP 48	Ел. заштита од Си ленти околу секоја жила	1, 3	16 - 300	6, 10, 20	А, Б, Г

4.3 КАБЛИ СО ИЗОЛАЦИЈА И ПЛАШТ ОД ГУМА

Гумените кабли, според местото на полагање (гумените кабли не се полагаат во земја), спаѓаат во групата изолирани водови. Служат за напојување со електрична енергија на специфични, подвижни потрошувачи со низок и среден напон поради што тие мораат да бидат максимално совитливи, еластични и лесни. Се изработуваат за различни намени и за напони 1, 3, и 6 kV.

На сликата 4.3 е прикажан изгледот и структурата на некои почесто применувани гумени кабли.



а) GG, 1 kV б) GN 50, 1 kV в) GN 58, 1 kV г) GN 64, 6 kV д) GN 62, 1 kV

Легенда: 1. Финожичен калаисан спроводник 2. Гумена изолација 3. Гумирана лента 4. Внатрешен гумен плашт ; 5. Памучна ткаенина 6. Команден спроводник 7. Контролен спроводник 8. Спроводна гума; 9. проводна лента; 10. Заштитен спроводник 11. Надворешен плашт од неопрен 12. Гумен плашт со црна боја.

Слика 4.3 Некои почесто применувани видови гумени кабли

За општа намена (без некои посебни специфичности и захтеви пред кабелот) најчесто се користи гумениот кабел тип GG за напони до 1 kV. Спроводниците од овој кабел имаат изолација од гума, преку која се поставува обвивка од текстилна лента. Жилите заедно со пополнувањето заемно се впредуваат а над така формираното јадро на кабелот се поставува внатрешниот плашт на кабелот од гума, па повторно обвивка од текстилни ленти, и конечно, надворешниот гумен плашт кој има црна боја. Спроводниците кај овој кабел, поради захтевите за голема совитливост, се изработуваат од тенки бакарни жички (лицни) впредени во јаже и се нарекуваат „финожични спроводници“. По правило, тие треба на својата површина да бидат калаисани. Кабелот тип GG се употребува на отворено, во влажни простории, во разни фабрички погони и работилници. Се користи за напојување на поголемите подвижни приемници (машини и алатки). Неговата главна предност во однос на останатите типови гумени кабли е во големата совитливост и во ниската цена, додека недостатоци му се слабата механичка отпорност и запалливоста.

Споменатите недостатоци што ги имаат каблите од типот GG се отстранети (на сметка на нивните добри особини) кај тешките руднички и работилнички гумени кабли од типот GN. Тие по својот состав и констукција се наполно исти со претходните, само што текстилните ленти се заменети со гумирани текстилни ленти а надворешниот плашт се изведува од неопрен. Неопренот е вештачка гума која е отпорна на абење, кинење, отпорна е на киселини, хемикалии, на атмосферските влијанија и покрај сето тоа, таа не гори.

Овој вид кабли се употребува во рудниците со површински или подземен коп, во каменоломите, градежништвото, тешката индустрија, во челичарниците, кај дигалките, крановите и слично.

5 ДОЗВОЛЕНО СТРУЈНО ОПТОВАРУВАЊЕ НА ЕНЕРГЕТСКИТЕ КАБЛИ

Дел од електричната енергија што се пренесува со кабелот се претвора во топлина во самиот кабел. Создадената топлина доведува до повишување на температурата на сите негови конструктивни елементи, а најмногу на спроводниците и изолацијата на кабелот. Дел од создадената топлина кабелот ја акумулира во себе, а остатокот го оддава во околната средина.

Изолацијата кај каблите е најчесто материја од органско потекло, која под дејство на повишената температура постепено се разградува (го менува својот хемиски состав) а со тоа ги менува и своите механички и изолациони особини во смисла на нивното влошување. Влошувањето на карактеристиките на изолацијата (со други зборови кажано, нејзиното „старење“) е особено интензивно кога температурата на изолацијата долготрајно надминува една определена гранична вредност. Во тој случај доаѓа до забрзано стареење и на самиот кабел и скратување на неговиот животен век. Така, на пример, енергетскиот кабел кој во нормални услови на експлоатација би имал век на траење 20 години, во услови на забрзано стареење под дејство на повишената температура може да има век на траење 10, 5 па и само неколку години. После истекот на тој рок, „остарениот“, односно амортизираниот кабел почнува да станува извор на проблеми кои се согледуваат во нагло зголемениот годишен број на дефекти, пробиви на изолацијата, прекини на погонот, пожари и слично, а тоа пак ќе услови од своја страна потреба од неговата замена со нов кабел, што е сврзано, меѓу другото, и со нови трошоци и нови инвестиции.

Покрај тоа, кај класичните кабли со изолација од импрегнирана хартија (IP, NP), под дејство на прекумерното и често загревање, доаѓа до ширење и трајна деформација на оловниот плашт а тоа доведува до појава на вакуумски и гасни шуплини во изолацијата, кои, како што ќе видиме, претставуваат опасност за самата изолација.

Со загревањето на жилите од кабелот под дејство на струјното оптоварување, доаѓа до зголемување на обемот на неговото јадро и до повишување на внатрешниот притисок врз самиот плашт. Ова повишување на внатрешниот притисок врз плаштот се должи на тоа што температурниот коефициент на ширење на импергантот во изолацијата е за 10 ÷ 20 пати поголем од коефициентот на ширење на оловото, бакарот или алуминиумот и тоа предизвикува трајни деформации на металниот плашт.

По намалувањето на струјното оптоварување, настанува постепено ладење на кабелот и намалување на обемот на елементите од јадрената конструкција. Најнапред се ладат надворешните слоеви од изолацијата поради што течниот импрегнант во изолацијата почнува да мигрира спрема нејзината периферија а внатрешните слоеви од изолацијата, кои се во непосреден допир со спроводниците, остануваат делумно суви и во нив се образуваат шуплини. Електричното поле во така создадените шуплини има неколкукратно поголема јачина во однос на полето што се има во самата изолација. Тоа доведува до интензивна јонизација на гасот во шуплините, јонско бомбардирање на изолацијата и создавање озон кој ја разорува изолацијата, а сето тоа води кон нејзино забрзано стареење.

Во нормален погон на работа, топлина се развива во следните елементи на кабелот:

- во спроводниците, при течење на струја (поради цуловиот ефект);
- во металниот плашт (поради индуцираните вртложни струи);

- во изолацијата (поради ефектот на диелектричен хистерезис како и поради нејзината несовершенство, т.е. постоењето на некаква кондуктивна спроводност);
- во челичната арматура (исто така поради индуцираните вртложни струи).

Кај каблите кои спроведуваат еднонасочна струја, ефектите што ги создава наизменичното електрично и магнетско поле отпаѓаат, па на тој начин, како извори на топлина остануваат само џуловите загуби во спроводниците и кондуктивната струја низ изолацијата под дејство на погонскиот напон.

Од наброените извори на топлина, најголем удел во порастот на температурата отпаѓа на загубите во спроводниците поради џуловиот ефект. Загубите во изолацијата се состојат од две компоненти: загуби поради постоење на кондуктивна струја во самата изолација (кои се занемарливо мали кај современите кабли) и загуби поради ефектот на диелектричен хистерезис. Последниве загуби се занемарливо мали кај каблите за низок и среден напон и изнесуваат само неколку проценти од џуловите загуби, па како такви, тие можат слободно да се занемарат. Но кај каблите со висок напон (110 и 220 kV) тие можат да изнесуваат и десетина проценти, додека кај каблите со највисоки напони тие се веќе мерливи со џуловите загуби.

Кај современите кабелски конструкции загубите во металниот плашт и челичната арматура се мали во споредба со џуловите загуби, па често пати нив ги занемаруваме.

5.1 МАКСИМАЛНИ ДОЗВОЛЕНИ ТЕМПЕРАТУРИ НА СПРОВОДНИЦИТЕ

Со цел да се избегне забрзаното стареење на кабелот поради неговото прекумерно загревање во погонот неопходно е температурата на спроводниците, а со тоа и температурата на изолацијата на кабелот, да бидат ограничени.

Табела 5.1 Максимални дозволени температури на спроводниците кај енергетските кабли во нормален (траен) погон и во режим на куса врска

Вид на кабелот		Номинален напон [kV]	Температура [°C] на спровод. во нормален погон	Температура [°C] на спровод. во режим на к врска
Кабли со Изолација IP, NP	Појасни кабли	1, 3, 6	80	180
		10	65	165
	Едножилни кабли	10	70	170
	Кабли со 3 метални плашта	20	65	155
	Заштитени Н – кабли	35	60	140
Кабли со изолација од PVC		1, 3, 6	70	160
		10	65	160
		20	60	140
Кабли со изолација од PE		6 - 35	70	150
Кабли со изолација од XPE		1 - 35	90	250

Кај нас, со стандардот МКС.Н.Ц5 020/72 се дефинирани температурите на спроводниците што не смеат да бидат пречекорени во текот на непрекинатата работа на кабелот. Овие температури зависат од употребената изолација, а зависат и од номиналниот напон на кабелот. Нивните вредности се дадени во табелата 5.1.

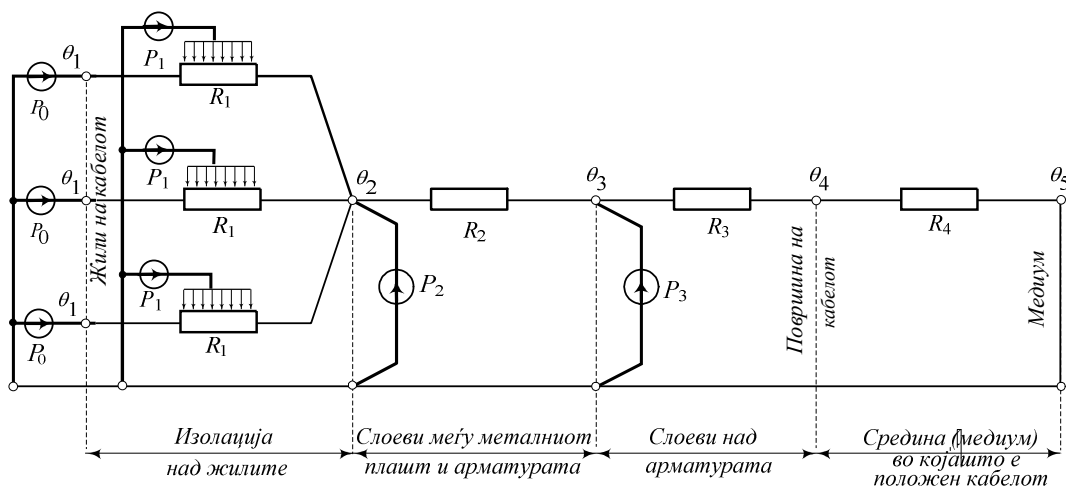
5.2 ЕКВИВАЛЕНТНА ТОПЛИНСКА ШЕМА НА КАБЕЛОТ

Во услови на стационарен погон (струјното оптоварување на кабелот е константно, т.е. временски непроменливо) и во услови на топлинска рамнотежа, кога загубите што се остваруваат во кабелот се еднакви на моќноста што кабелот ја оддава во околната средина, температурата θ во одделните елементи од кабелската конструкција е константна. Во такви услови, температурата¹ на кабелот зависи од:

1. струјното оптоварување на кабелот I ;
2. условите за одведување на настанатата топлина.

Условите за одведување на настанатата топлина од своја страна зависат од конструкцијата, структурата и димензиите на кабелот, од температурата на околната средина и од топлинскиот отпор на таа средина. За да биде појасен процесот на создавање и одведување на топлината од кабелот, ќе се послужи́ме со еквивалентната топлинска шема на кабелот, прикажана на сликата 5.1.

Користејќи ја формалната аналогија што постои помеѓу равенките со коишто се опишуваат топлинските и струјните процеси во природата, на база на шемата од слика 5.1 може да се формира едно еквивалентно електрично коло со чија помош би можеле да ги решаваме термичките процеси во кабелот. Во таа аналогија, она што беше потенцијал V во електричните кола, ќе биде температурата θ кај еквивалентното топлинско коло; на струјата I во електричното коло ќе и одговара топлинскиот флукс Φ а и во двете кола постои електричниот, односно топлинскиот отпор R . Значи, ако изворите на топлина во кабелот ги претставиме со соодветни еквиваленти струјни генератори и ако топлинските отпори ги претставиме со соодветни електрични отпорници, ќе добиеме едно еквивалентно електрично коло, слично на она од сл. 5.1, со помош на кое ќе можеме да ја пресметаме температурата θ во поедините слоеви од конструкцијата на кабелот.



Слика 5.1 Екв. топлинска шема на кабел што работи во услови на топлинска рамнотежа

¹ Отсега натаму, кога ќе зборуваме за температура на кабелот, ќе мислиме на температурата на спроводниците од кабелот која е наедно и температура на внатрешните слоеви на неговата изолација.

Во сликата 5.1 се воведени следните означувања:

- P_0 загуби по единица должина што се остваруваат во еден спроводник;
- P_1 загуби по единица должина што се остваруваат во изолацијата;
- P_2 загуби по единица должина што се остваруваат во металниот плашт;
- P_3 загуби по единица должина што се остваруваат во челичната арматура;
- n број на спроводници (жили) низ кои тече струја I ;
- R_1 топлински отпор на изолацијата;
- R_2 топлински отпор на слојот помеѓу металниот плашт и челичната арматура;
- R_3 топлински отпор на слојот над челичната арматура;
- R_4 топлински отпор на околната средина во која е поставен кабелот;
- θ_1 температура на спроводниците (т.е. температура на внатрешниот слој од изолацијата);
- θ_4 температура на површината на кабелот.
- θ_5 температура на околниот амбиент ($\theta_5 = \theta_a$).

Применувајќи ја споменатата формална аналогија на топлинските и струјните процеси, со помош на шемата од сликата 5.1. добиваме:

$$\theta_1 = \theta_5 + R_1 \cdot (P_0 + P_1 / 2) + R_2 \cdot [P_2 + n \cdot (P_0 + P_1)] + (R_3 + R_4) \cdot [P_2 + P_3 + n \cdot (P_0 + P_1)] . \quad (5.1)$$

Ако со $\Delta\theta$ ($\Delta\theta = \theta_1 - \theta_5$) ја означиме разликата помеѓу температурата на спроводниците (која е наедно температура на внатрешниот слој од изолацијата на жилите од кабелот) и амбиентната температура, т.е. таканаречената „*надтемпература*“ на кабелот, тогаш ќе имаме:

$$\Delta\theta = R_1 \cdot (P_0 + P_1 / 2) + R_2 \cdot [P_2 + n \cdot (P_0 + P_1)] + (R_3 + R_4) \cdot [P_2 + P_3 + n \cdot (P_0 + P_1)] . \quad (5.2)$$

Со занемарување на загубите на моќност во изолацијата, во металниот плашт и во арматурата, што е кај каблите за низок и среден напон сосема прифатливо, се добива:

$$P_1 \approx P_2 \approx P_3 \approx 0 , \quad (5.3)$$

па сега релацијата (5.2) добива нешто поупростен облик:

$$\Delta\theta = P_0 \cdot [R_1 + n \cdot (R_2 + R_3 + R_4)] . \quad (5.4)$$

Цуловите загуби по единица должина P_0 што се остваруваат во еден од спроводниците изнесуваат:

$$P_0 = r \cdot I^2 , \quad (5.5)$$

каде што r е активниот отпор по единица должина на спроводникот за наизменична струја, а I е ефективната вредност на струјата што тече низ секој од спроводниците.

Со оглед на последните три релации, може да се воспостави следната врска помеѓу *надтемпературата* $\Delta\theta$ и струјното оптоварување на кабелот I :

$$I = \sqrt{\frac{\Delta\theta}{r \cdot [R_1 + n \cdot (R_2 + R_3 + R_4)]}} . \quad (5.6.a)$$

Значи во стационарен режим на работа на кабелот, кога неговото оптоварување временски не се менува, и во услови на топлинска рамнотежа, надтемпературата $\Delta\theta$ е пропорционална на квадратот од струјата I , т.е.

$$\Delta\theta = K \cdot I^2. \quad (5.6.б)$$

Доколку ни е позната температурата θ_a на средината (амбиентот) во која е поставен кабелот и доколку ни е позната максималната температура $\theta_{\max.T}$ на спроводниците што не смее да биде пречекорена (табела 5.1.), тогаш со помош на релацијата (5.6.а) можеме да ја пресметаме и максимална дозволената струја на кабелот I_{\max} која уште се нарекува и трајно дозволена струја I_d ($I_d \equiv I_{\max}$)

$$I_d \equiv I_{\max} = \sqrt{\frac{\theta_{\max.T} - \theta_a}{r \cdot [R_1 + n \cdot (R_2 + R_3 + R_4)]}} = \sqrt{\frac{\Delta\theta_{\max}}{r \cdot [R_1 + n \cdot (R_2 + R_3 + R_4)]}} \quad (5.7)$$

Врз основа на (5.6 а, 5.6 б) и (5.7) може да се добијат следните релации:

$$\frac{I}{I_{\max}} = \sqrt{\frac{\Delta\theta}{\Delta\theta_{\max}}} \quad (5.8)$$

$$\Delta\theta = \Delta\theta_{\max} \cdot \left(\frac{I}{I_{\max}}\right)^2. \quad (5.9)$$

5.3 ДОЗВОЛЕНО СТРУЈНО ОПТОВАРУВАЊЕ НА КАБЛИТЕ ВО ТРАЕН ПОГОН

Трајната температура што ја достигнуаат спроводниците во погонот при определено струјно оптоварување I , т.е. работната температура на кабелот, како што веќе видовме, зависи од температурата на амбиентот и од условите на ладење на кабелот (одведување на ослободената топлина), односно зависи од:

- топлинскиот отпор на изолацијата, т.е. нејзиниот состав и дебелина (поради што каблите за висок напон, кои имаат подебел изолационен слој, поднесуваат помали струјни оптоварувања од каблите со ист пресек но за понизок напон);
- топлинскиот отпор на заштитните слоеви на кабелот (внатрешен и надворешен);
- топлинскиот отпор на амбиентот;
- температурата на амбиентот (земја, воздух, зимо, лето, итн).

Меѓутоа, температурата на спроводниците зависи и од условите што владеат на трасата каде што е положен кабелот, т.е. зависи и од некои други фактори како што се:

- присуството на топоводи положени во близината на трасата на кабелот и нивното термичко влијание на самиот кабел;
- смалување на топлинската спроводност на тлото заради сушењето на земјата под дејство на перманентното оддавање на топлина од кабелот;
- начинот на полагање на кабелот (каблите);
- бројот на паралелно положените кабли во заедничката траса;
- друго.

Од изнесеното произлегува дека пресметувањето на дозволеното струјно оптоварување на еден кабел претставува сложена задача која зависи од низа околности и поголем број фактори кои тешко се квантифицираат и моделираат, или пак тие воопшто не можат аналитички (туку само емпириски) да се опфатат во пресметките.

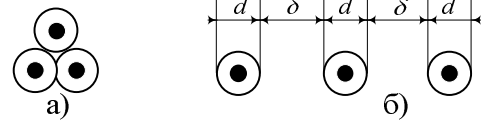
Понекогаш некои влијателни фактори скоро и не можат да се предвидат, а често пати недостасуваат прецизни податоци за условите што ќе владеат на идната траса (нпр. состав на земјиштето, процентот на влага во него, специфичната топлинска отпорност, присуство на соседни објекти и слично). Затоа аналитичкиот начин на определување на дозволеното струјно оптоварување на каблите со помош на моделите опишани со релациите (5.1)...(5.7) има повеќе теориско и нагледно (едукативно), отколку практично значење. Од тие причини, во практиката, дозволените струјни оптоварувања на каблите во општ случај се определуваат на многу попрктичен начин, со помош на претходно изготвени табели, добиени на база на долгогодишни експериментирања. Овој пристап исто така овозможува, на правилен и доволно прецизен начин, да бидат опфатени практично сите релевантни фактори битни за загревањето на кабелот.

Табелите за кои станува збор се однесуваат на типичните (најчесто применуваните) начини на полагање на каблите и на вообичаените услови во поглед на ладењето на каблите долж трасата, така што обично не ќе има потреба од дополнителни корекции (за кои ќе стане збор подоцна) на отчитаните вредности за дозволеното струјно оптоварување. Табелите се однесуваат на случајот кога се работи за единечно положен кабел (на пример еден повеќежилен кабел е положен во земја или во воздух) и на случајот кога кабелски систем односно кабелска тројка, составена од 3 едножилни кабли кои ги сочинуваат трите фазни спроводници од трифазниот кабелски вод, е положена во земја или воздух, во рамнина или во триаголник.

Табелите 5.2 ÷ 5.9 од кои се отчитуваат дозволените струјни оптоварувања на разните видови кабли, се однесуваат на следните услови (претпоставки) во поглед на загревањето/ладењето на каблите што владеат на трасата:

a) Кабли положени во земја

- 1 Температурата на земјата на длабочината на која е положен кабелот изнесува 20°C ;
- 2 Специфичната топлинска отпорност на земјиштето изнесува $100^{\circ}\text{C}/\text{cm}/\text{W} \equiv 1^{\circ}\text{K} \cdot \text{m}/\text{W}$.



а) во триаголник б) во рамнина

Слика 5.2. Начини на полагање на кабелски вод, составен од 3 едножилни кабли

- 3 Кабелот (каблите) се полагаат директно во земјата или во песочна постела, на длабочина од 70 cm, заштитени одозгора со заштитна опека (цигла) поставена над кабелот;
- 4 Доколку кабелот е одозгора заштитен со пластичен штитник, тогаш при добро пополнување на просторот меѓу кабелот и штитникот, со песок или земја, отчитаното дозволено струјно оптоварување ќе треба да се намали за 10%, т.е. да се корегира со корекционен фактор 0,9. Во спротивно, кога тој услов не е исполнет, корекционениот фактор изнесува 0,8;
- 5 Дозволените струјни оптоварувања на каблите, наведени во табелите 5.2...5.9 се однесуваат на таканареченото „дистрибутивно оптоварување“. Под дистрибутивно оптоварување на еден кабел се подразбира таков циклус на оптоварување во текот на денот (24 h) кој се состои од период со траење од најмногу 10 часа во текот на кој струјното оптоварување на кабелот е приближно еднакво на своето максимално (полно) оптоварување (100%), после кој следи ист таков или подолг







период, во текот на кој струјното оптоварување на кабелот изнесува најмногу 60% од своето полно оптоварување.

- 6 Доколку кабелот (каблите) се трајно оптоварени со константна струја, тогаш, поради опасност од сушење на земјиштето, вредностите за дозволените струјни оптоварувања, отчитани од табелите 5.2...5.9 и, по потреба, соодветно корегирани, се намалуваат за дополнителни 25%, т.е. се множат со дополнителен корекционен фактор 0,75. Последнава одредба не се применува на каблите што се поставени во тло со висока специфична отпорност поради што кај нив е веќе извршена корекција (односно редуција) на дозволеното струјно оптоварување, според табелата 5.11;
- 7 Кога станува збор за кабелски системи (кабелски тројки) составени од по три едножилни кабли, тогаш трите едножилни кабли од секој сноп се поставени во триаголник, при што каблите меѓусебно се допираат, или пак тие се положени во рамнина, при што растојанието δ помеѓу секои два соседни кабли изнесува приближно $\delta = 7 \text{ cm}$ (сл. 5.2).







б) Кабли положени во воздух

- 1 Кабелот е трајно оптоварен со своето полно струјно оптоварување;
- 2 Температурата на воздухот изнесува 30°C и во околината не постојат други извори на топлина;
- 3 Одведувањето на топлината од каблите се врши несметано, по пат на зрачење или конвекција и каблите се заштитени од директното зрачење на сонцето;
- 4 Просторот во којшто е положен кабелот (каблите) е доволно простран и проветрен така што температурата на воздухот поради загревањето од каблите не надминува 30°C, или пак, во спротивно, порастот на температурата на воздухот над 30°C е земен предвид со помош на табелата 5.15;
- 5 Кога станува збор за кабелски системи или кабелски тројки, составени од по три едножилни кабли, тогаш трите едножилни кабли од секоја тројка се поставуваат во триаголник, при што каблите се допираат (сл. 5.2. а), или пак тие се положени во рамнина (сл. 5.2. б), при што растојанието δ помеѓу секои два соседни кабла е еднакво на преченикот d на каблите ($\delta = d$).







**Табела 5.2 Дозволено струјно оптоварување [А]
за кабли со изолација PVC, положени во земја**

Ном. пресек mm ²	1 kV			6 kV			10 kV		
	1-жилни 	1-жилни 	3 и 4 жилни	1-жилни 	1-жилни 	3 - жилни	1-жилни 	1-жилни 	3-жилни
<i>Спроводници од бакар Cu</i>									
1.5	-	-	27	-	-	-	-	-	-
2.5	-	-	36	-	-	-	-	-	-
4	-	-	46	-	-	-	-	-	-
6	-	-	58	-	-	-	-	-	-
10	-	-	77	-	-	76	-	-	-
16	120	110	100	115	105	98	110	100	93
25	155	140	130	150	135	125	140	130	120
35	185	170	155	185	165	150	165	155	145
50	220	200	185	210	195	175	195	185	170
70	270	245	230	260	240	220	245	230	210
95	325	295	275	310	285	260	290	270	245
120	370	335	315	350	325	295	330	310	280
150	420	380	355	390	365	335	370	345	320
185	470	430	400	445	415	370	420	395	355
240	540	490	465	510	480	425	490	460	405
300	620	550	525	570	540	475	550	520	450
400	710	650	600	660	620	540	620	590	520
500	820	740	-	-	-	-	-	-	-
<i>Спроводници од алуминиум Al</i>									
4	-	-	36	-	-	-	-	-	-
6	-	-	45	-	-	-	-	-	-
10	-	-	60	-	-	59	-	-	-
16	93	84	78	90	82	76	83	77	72
25	120	110	100	115	105	97	110	100	92
35	145	130	125	140	125	115	130	120	110
50	170	155	145	165	150	135	155	140	130
70	210	190	175	205	185	170	190	175	160
95	250	230	215	240	220	200	230	210	190
120	290	260	245	275	255	230	260	240	215
150	325	295	275	305	285	260	290	270	245
185	365	330	310	350	325	290	330	305	280
240	420	380	360	405	375	330	385	360	315
300	475	430	410	455	425	380	430	405	355
400	550	500	470	520	490	425	495	465	410
500	630	570	-	-	-	-	-	-	-







**Табела 5.3 Дозволено струјно оптоварување [А]
за кабли со изолација PVC, положени во воздух**

Ном. пресек	1 kV			6 kV			10 kV		
	1-жилни 	1-жилни 	3 и 4 жилни	1-жилни 	1-жилни 	3 - жилни	1-жилни 	1-жилни 	3-жилни
<i>Спроводници од бакар Cu</i>									
1.5			18						
2.5			25						
4			34						
6			44						
10			60			65			
16	100	86	80	105	94	86	97	89	83
25	135	120	105	135	125	110	125	115	110
35	170	145	130	165	155	135	155	145	130
50	205	180	160	200	185	165	185	170	155
70	260	225	200	255	235	205	235	220	195
95	320	280	245	310	285	250	285	265	235
120	375	330	285	360	330	285	330	305	270
150	430	380	325	405	370	325	370	345	310
185	490	440	370	465	430	370	430	405	350
240	590	530	500	550	510	430	510	475	400
300	680	610	500	640	600	490	590	550	450
400	780	720	600	760	710	570	700	650	530
500	900	810							
<i>Спроводници од алуминиум Al</i>									
4			26						
6			34						
10			46			50			
16	78	66	62	80	73	66	76	69	64
25	105	94	82	105	96	87	100	91	84
35	130	115	100	130	115	105	120	110	100
50	160	140	125	155	140	130	145	135	120
70	200	175	155	200	180	160	185	170	150
95	245	220	190	240	220	195	220	205	185
120	290	255	220	275	255	220	255	235	210
150	335	295	250	315	290	250	290	270	240
185	380	340	330	365	335	285	335	310	270
240	460	410	395	435	400	340	400	370	310
300	535	470	445	500	465	390	460	430	350
400	600	550	530	600	560	450	550	510	420
500	690	630							











**Табела 5.4 Дозволено струјно оптоварување [А]
за кабли со изолација РЕ, положени во земја**

Номин. пресек	10 kV			20 kV		35 kV	
	1-жилни 	1-жилни 	3 - жилни	1-жилни 	1-жилни 	1-жилни 	1-жилни 
<i>Спроводници од бакар Си</i>							
25	160	140	135	150	140		
35	195	170	160	185	175	180	170
50	225	200	190	220	205	215	200
70	275	245	230	265	250	260	250
95	330	295	280	315	295	310	295
120	375	335	320	360	340	355	335
150	400	375	360	395	380	390	370
185	450	425	405	450	430	440	420
240	515	490	465	510	500	500	490
300	575	550	525	565	560	560	550
400	630	620		645	640	630	625
<i>Спроводници од алуминиум Al</i>							
25	125	110	105	120	110		
35	145	135	125	140	135	140	135
50	175	160	145	170	160	170	160
70	215	190	180	205	195	205	200
95	255	230	215	245	230	245	230
120	285	260	245	280	270	275	265
150	315	295	275	310	300	305	290
185	360	330	310	350	340	345	330
240	400	385	360	405	390	395	385
300	455	430	410	450	440	440	430
400	520	500		510	505	500	495











**Табела 5.5 Дозволено струјно оптоварување [А]
за кабли со изолација РЕ, положени во воздух**

Номин. пресек	10 kV			20 kV		35 kV	
mm ²	1-жилни 	1-жилни 	3 - жилни	1-жилни 	1-жилни 	1-жилни 	1-жилни 
<i>Спроводници од бакар Si</i>							
25	155	135	120	155	140		
35	185	160	140	190	165	190	165
50	220	190	165	220	200	225	205
70	280	235	210	280	240	280	250
95	335	285	250	330	300	330	305
120	385	330	295	385	340	385	350
150	420	375	330	430	385	435	400
185	475	435	380	480	445	485	455
240	565	515	450	565	520	570	535
300	645	595	510	635	600	640	605
400	720	690		720	695	720	705
<i>Спроводници од алуминиум Al</i>							
25	120	105	95	120	110		
35	145	125	110	145	130	145	130
50	170	150	130	170	155	175	160
70	220	185	160	220	190	220	195
95	255	225	195	260	230	260	235
120	300	260	225	300	265	300	270
150	335	295	255	340	300	340	310
185	385	340	290	380	345	380	355
240	460	400	345	450	410	450	420
300	515	465	390	505	470	510	475
400	590	540		580	545	590	550

**Табела 5.6 Дозволено струјно оптоварување [А]
за кабли со изолација од вмрежен полиетилен ХРЕ
или етилен-пропилен EPDM, положени во земја**

Номин. пресек	1 kV			10 kV			20 kV		35 kV		
	mm ²	1-жилни 	1-жилни 	3 и 4 жилни 	1-жилни 	1-жилни 	3-жилни 	1-жилни 	1-жилни 	1-жилни 	1-жилни 
<i>Спроводници од бакар Si</i>											
1.5			30								
2.5			40								
4			50								
6			65								
10			85								
16	140	125	115								
25	175	160	150	180	165	150					
35	210	195	175	215	200	180	220	200			
50	250	230	210	250	235	215	255	240	245	230	
70	310	280	260	310	290	265	310	295	305	290	
95	370	335	315	370	345	315	370	350	360	350	
120	425	385	360	420	395	360	415	400	415	390	
150	480	435	405	460	440	400	450	440	445	430	
185	540	490	460	530	500	455	505	505	490	490	
240	620	560	535	610	580	525	575	585	565	570	
300	710	630	595	690	650	600	630	650	630	640	
400	815	745	690	780	750		700	750	720	730	
500	940	850									
<i>Спроводници од алуминиум Al</i>											
4			40								
6			50								
10			70								
16			90								
25	135	110	115	140	130	115					
35	165	140	135	165	155	140	170	160			
50	195	170	165	195	180	165	195	185	195	185	
70	240	210	200	240	225	205	240	230	235	225	
95	285	270	245	290	270	245	285	270	280	270	
120	330	310	280	325	305	280	320	310	315	300	
150	375	360	315	360	340	315	360	345	355	335	
185	420	415	355	410	385	355	400	390	390	385	
240	480	500	415	480	455	415	460	455	455	450	
300	545	570	470	545	510	470	510	510	510	510	
400	630	670	540	625	590		580	600	580	585	
500	720	765									

**Табела 5.7 Дозволено струјно оптоварување [А]
за кабли со изолација од вмрежен полиетилен ХРЕ
или етилен-пропилен EPDM, положени во воздух**

Номин. пресек	1 kV			10 kV			20 kV		35 kV		
	mm ²	1-жилни 	1-жилни 	3 и 4 жилни 	1-жилни 	1-жилни 	3-жилни 	1-жилни 	1-жилни 	1-жилни 	1-жилни 
<i>Спроводници од бакар Си</i>											
1.5			20								
2.5			30								
4			40								
6			55								
10			75								
16	120	105	95								
25	165	145	130	175	160	135					
35	205	175	160	210	190	165	220	200			
50	250	220	195	255	230	200	260	245	280	250	
70	315	275	245	320	285	250	320	300	350	310	
95	390	340	300	385	345	305	390	370	400	370	
120	455	405	350	440	400	350	450	420	470	425	
150	525	465	395	500	455	400	500	475	530	490	
185	600	535	450	580	525	460	570	550	595	555	
240	720	645	530	680	625	550	660	645	695	655	
300	830	745	610	780	725	630	760	730	780	730	
400	950	880	730	890	850		880	840	910	860	
500	1100	980									
<i>Спроводници од алуминиум Al</i>											
4			30								
6			40								
10			55								
16	95	80	75								
25	130	110	100	130	125	110					
35	160	140	120	170	150	130	175	155			
50	195	170	150	205	180	155	210	190	220	195	
70	245	215	190	255	220	195	255	235	270	240	
95	300	270	230	305	270	240	310	285	330	290	
120	355	310	270	350	310	275	360	330	370	330	
150	410	360	305	390	355	315	400	375	420	380	
185	465	415	350	450	410	360	455	430	470	435	
240	560	500	415	530	490	425	525	505	545	515	
300	645	575	475	615	560	480	590	570	630	590	
400	730	670	560	710	665		680	670	710	700	
500	840	770									

Табела 5.8 Дозволено струјно оптоварување [А] за кабли со изолација од импергнирана хартија IP, положени во земја

Номин. пресек	Трижилен кабел со заеднички оловен плашт (IPO13)		Трижилен кабел со три заеднички плашта (IPZO13)		Три едножилни неармирани кабли, положени во рамнина			Три едножилни неармирани кабли, положени во сноп			
	mm ²	6 kV	10 kV	20 kV	35 kV	10 kV	20 kV	35 kV	10 kV	20 kV	35 kV
<i>Спроводници од бакар Cu</i>											
6	59										
10	80	69									
16	105	90			115			105			
25	135	120	120		150	140		135	130		
35	165	145	145	135	180	165	155	165	155	145	
50	195	170	175	160	215	200	185	200	185	175	
70	245	215	215	200	265	245	230	245	230	215	
95	290	255	255	240	315	290	270	290	270	255	
120	330	290	290	270	355	330	310	330	310	290	
150	375	325	325	305	400	370	345	375	350	330	
185	420	365	365	340	450	410	385	420	390	370	
240	480	420	420	390	510	470	435	480	450	425	
300	540	470	465	435	560	520	485	540	510	480	
400	620	540	530	500	640	590	550	620	590	550	
500			580	540	700	650	600	690	650	610	
<i>Спроводници од алуминиум Al</i>											
6	45										
10	60	52									
16	79	69			88			80			
25	100	89	92		115	105		105	97		
35	125	110	110	105	135	125	120	125	120	110	
50	150	130	130	125	165	150	140	150	140	130	
70	190	165	165	155	205	190	175	190	175	165	
95	225	195	195	185	240	225	210	225	210	195	
120	255	225	220	210	275	255	240	255	240	225	
150	290	255	250	235	310	290	270	290	270	255	
185	330	285	285	265	350	320	300	325	305	285	
240	375	325	325	305	400	370	345	375	350	330	
300	420	370	365	345	450	420	390	420	400	375	
400	490	430	420	400	510	480	450	490	465	440	
500			470	445	570	530	500	550	520	490	

Табела 5.9 Дозволено струјно оптоварување [A] за кабли со изолација од импергнирана хартија IP, положени во воздух

Номин. пресек	Трижилен кабел со заеднички оловен плашт (IPO13)		Трижилен кабел со три заеднички плашта (IPZO13)		Три едножилни неармирани кабли, положени во рамнина			Три едножилни неармирани кабли, положени во сноп			
	mm ²	6 kV	10 kV	20 kV	35 kV	10 kV	20 kV	35 kV	10 kV	20 kV	35 kV
<i>Спроводници од бакар Си</i>											
6	50										
10	68	59									
16	90	78			105			100			
25	120	105	115		145	135		130	125		
35	150	125	140	130	175	165	150	165	155	145	
50	180	155	165	155	215	200	180	200	185	175	
70	230	195	205	195	270	250	230	250	240	220	
95	280	235	245	230	330	300	275	305	285	265	
120	325	270	280	265	380	350	320	355	330	305	
150	370	310	320	300	440	400	360	410	380	350	
185	420	355	360	340	500	455	410	470	435	400	
240	490	410	420	390	580	530	475	540	510	465	
300	560	470	480	440	660	600	540	630	580	530	
400	660	550	560	510	770	700	630	750	690	630	
500			620	570	870	780	700	840	780	710	
<i>Спроводници од алуминиум Al</i>											
6	39										
10	53	45									
16	70	60			82			77			
25	91	78	85		110	100		100	95		
35	110	95	105	96	135	120	115	125	115	110	
50	140	115	125	115	165	150	140	155	140	135	
70	175	150	160	150	210	190	175	195	180	170	
95	215	180	190	180	255	230	210	235	220	205	
120	250	210	220	205	295	270	245	275	255	235	
150	285	240	250	235	340	310	280	315	295	270	
185	325	275	285	265	385	350	320	365	335	310	
240	385	320	330	310	450	410	375	430	395	365	
300	440	370	380	350	520	470	430	495	455	420	
400	530	440	440	410	620	560	500	590	540	500	
500			500	460	700	630	570	680	620	570	

5.4 ВЛИЈАНИЕ НА ОКОЛИНАТА И НАЧИНОТ НА ПОЛАГАЊЕТО НА КАБЛИТЕ ВРЗ НИВНОТО ДОЗВОЛЕНО СТРУЈНО ОПТОВАРУВАЊЕ

Како што веќе напоменавме, табелите 5.2 – 5.9 се однесуваат на случајот кога единечен повеќежилен кабел, или пак сноп од три едножилни кабли, кои го формираат трифазниот кабелски вод, се положени во земјата односно во воздухот, на еден од претходно опишаните начини и во точно дефинираните услови на полагање. Но кога условите на полагање на кабелот (каблите) се разликуваат од претпоставените, тогаш дозволените струјни оптоварувања отчитани од споменатите табели ќе треба да се корегираат со некој корекционен фактор f . Големината на овој корекционен фактор зависи од повеќе чинители па затоа тој, во принцип, претставува производ од повеќе засебни (парцијални) корекциони фактори, т.е:

$$f = f_1 \cdot f_2 \cdot f_3 \quad \text{– за кабли положени во земја;} \quad (5.10)$$

$$f = f_4 \cdot f_5 \quad \text{– за кабли положени во воздух.} \quad (5.11)$$

5.4.1 Корекциони фактори за кабли положени во земја

5.4.1.1 Влијание на специфичната топлинска отпорност на тлото – фактор f_1

Условите за ладење на кабелот положен во земја во голема мерка зависи од составот на тлото, содржината на влага во него, длабочината на закопување и слично. Различни видови земјиште различно ја спроведуваат топлината, или како што велиме, имаат различна специфична топлинска отпорност. За илустрација ќе ни послужи табелата 5.10 во која се дадени вредностите на специфичната топлинска отпорност на некои видови земјиште.

Табела 5.10 Специфична топлинска отпорност ρ ($^{\circ}\text{C}\cdot\text{m}/\text{W}$) на разни видови земјишта

М а т е р и ј а л	ρ ($^{\circ}\text{C}\cdot\text{m}/\text{W}$)	М а т е р и ј а л	ρ ($^{\circ}\text{C}\cdot\text{m}/\text{W}$)
Земја, нормално сува	1,3	Варовник	0,78
Земја, нормално влажна	0,4 ÷ 0,7	Чакал	0,54
Земја, песоклива сува	1 ÷ 1,2	Шљака	3,5 ÷ 7
Земја, песоклива влажна	0,5 ÷ 0,6	Органски материи, суви	4
Земја, глинеста сува	1,4	Цигла	1,9
Земја, глинеста влажна	0,8	Бетон	1,2 ÷ 1,3
Речен песок, сув	3	Вода	1,7
Речен песок, нормално влажен	1	Воздух	40
Речен песок, заситен со влага	0,75	Изолација IP	5 ÷ 6,5
Фелдспад	0,4	PVC	7
Базалт	0,6	PE	3 ÷ 4
Кварц	0,11	XLPE	3,5
Гранит	0,25 ÷ 0,32	Импрегнирана јута	6

Кога специфичната топлинска отпорност на тлото се разликува од претпоставените $1^{\circ}\text{C}\cdot\text{m}/\text{W}$, тогаш корекциониот фактор f_1 со кој се уважува таа разлика, се пресметува со помош на релацијата (5.12) при што вредностите на факторите f_{1A} и f_{1B} се добиваат со помош на табелите 5.11 и 5.12.

$$f_1 = f_{1A} \cdot f_{1B} \quad (5.12)$$

Табела 5.11 Фактор f_{1A} - зависност од пресекот на спроводниците

ρ [$^{\circ}\text{C}\cdot\text{m}/\text{W}$]	0,7	1,0	1,2	1,5	2,0	2,5	3,0
до 25 mm ²	1,11	1,00	0,94	0,87	0,78	0,72	0,67
35 - 95 mm ²	1,13	1,00	0,93	0,86	0,76	0,70	0,64
120 - 240 mm ²	1,14	1,00	0,93	0,85	0,76	0,69	0,63
300 - 500 mm ²	1,15	1,00	0,92	0,85	0,75	0,68	0,63

Табела 5.12 Фактор f_{1B} - зависност од номиналниот напон U_n и типот на кабелот

Специфична топлинска отпорност ρ [$^{\circ}\text{C}\cdot\text{m}/\text{W}$]	0,7	1,0	1,2	1,5	2,0	2,5	3,0
3 и 4-жилни кабли, 1 kV	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
2-жилни, 1 kV, појасни 6, 10 kV	0,98	1,00	1,01	1,01	1,02	1,02	1,03
3-жилен Н-кабел до 35 kV	0,97	1,00	1,01	1,02	1,03	1,04	1,05
3 едножилни кабли до 35 kV	1,01	1,00	1,00	0,98	0,97	0,97	0,96

5.4.1.2 Влијание на температурата на почвата – фактор f_2

Вообичаената природна температура на тлото, меродавна за определување на дозволеното струјно оптоварување на каблите, во повеќето европски земји изнесува околу 20°C . Оваа температура е всушност највисоката трајна температура што се постигнува во летниот период на длабочина 0,7 - 0,8 m во земјата. Меѓутоа, од определени причини (друга географска ширина, присуство на топловоди или други извори на топлина во близината и слично), можно е трајната температура на тлото во кое е положен кабелот да има и поинаква вредност. Доколку таа се разликува од претпоставените 20°C , тогаш дозволеното струјно оптоварување на кабелот, добиено со помош на табелите 5.2... 5.9 ќе треба да се корегира со факторот на корекција f_2 . Вредноста на овој фактор се отчитува од табелата 5.13.

Табела 5.13. Зависност на факторот f_2 од температурата на тлото

Температура на тлото ($^{\circ}\text{C}$)		5	10	15	20	25	30	35
PVC и PE кабли, до 35 kV		1,15	1,10	1,05	1,00	0,94	0,88	0,82
ХРЕ и EPDM кабли до 35kV		1,10	1,07	1,04	1,00	0,97	0,92	0,89
Кабли со изолација IP, NP	Појасни до 10 kV и Н-кабли, до 20 kV	1,00	1,00	1,00	1,00	0,94	0,88	0,82
	Н-кабли, 35 kV	1,00	1,00	1,00	1,00	0,93	0,87	0,79

5.4.1.3 Влијание на соседните, паралелно положени кабли - фактор f_3

Паралелно положените кабли во ист ров заемно си влијаат во смисла на влошување на условите за одведување на топлината. Затоа, најголемата струја со која смееме да го оптовариме кабелот кој е паралелно положен со други кабли ќе биде помала од дозволеното струјно оптоварување добиено според табелите 5.2... 5.9 кое се однесува на случајот кога е тој осамено положен. Оваа редуција на струјното оптоварување ја вршиме со помош на корекциониот фактор f_3 , а неговата вредност ја отчитуваме од табелата 5.14.

Табела 5.14. Влијание на соседните кабли - фактор f_3

Број на кабли во ист ров		2	3	4	5	6	8	10
Растојание меѓу каблите односно кабелските снопови (кабелските системи)	допир	0,79	0,67	0,63	0,58	0,55	0,50	0,46
	$\delta=7$ cm	0,85	0,75	0,68	0,64	0,60	0,56	0,53
	$\delta=15$ cm	0,86	0,77	0,72	0,68	0,64	0,61	0,58
	$\delta=25$ cm	0,87	0,78	0,74	0,71	0,67	0,64	0,52

5.4.2 Корекциони фактори за кабли положени во воздух

5.4.2.1 Влијание на температурата на воздухот - фактор f_4

Слично како и во претходните случаи, коишто се однесуваат на каблите положени во земја, и овде, кога каблите се положени во воздух, условите за одведување на топлината што владеат на местото на полагање на кабелот (трасата) влијаат врз струјната оптоварливост на каблите. Доколку трајната температура θ на воздухот долж сета траса или само на некои нејзини делови (ова последново се однесува само на случајот кога е таа над 30°C) е различна од претпоставените 30°C, тогаш вредностите за дозволеното струјно оптоварување на кабелот, отчитани од табелите 5.2 ... 5.9 се корегираат со помош на факторот f_4 , според табелата 5.15.

Табела 5.15 Зависност на факторот f_4 од температурата

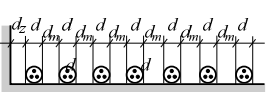

Температура на воздухот (°C)		15	20	25	30	35	40	45
PVC и PE кабли, до 35 kV		1,17	1,12	1,07	1,00	0,93	0,87	0,79
XPE и EPDM кабли, до 35 kV		1,13	1,09	1,05	1,00	0,94	0,89	0,84
Кабли со изолација IP, NP	Појасни до 10 kV	1,06	1,06	1,06	1,00	0,94	0,87	0,79
	H-кабли, до 20 kV	1,06	1,06	1,06	1,00	0,94	0,87	0,79
	H-кабли, 35 kV	1,00	1,00	1,00	1,00	0,91	0,82	0,71

5.4.2.2 Влијание на начинот на полагање на каблите - фактор f_5

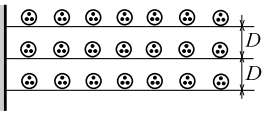

Освен температурата на околниот воздух, начинот на полагањето на каблите во воздухот како и нивниот број влијае, исто така, врз дозволеното струјно оптоварување на секој положен кабел. Влијанието на начинот на полагањето на каблите врз нивната струјна оптоварливост се опфаќа со факторот f_5 . Вредностите на овој фактор за некои

типични начини на полагање на каблите се дадени во табелите 5.16.а ÷ 5.16.г и 5.17.а ÷ 5.17.г. Притоа, табелите 5.16.а ÷ 5.16.г се однесуваат на 3 и 4-жилните кабли, додека табелите 5.17.а ÷ 5.17.г се однесуваат на кабелските системи (снопови) составени од по 3 едножилни кабли.

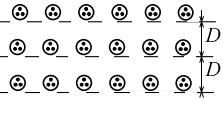
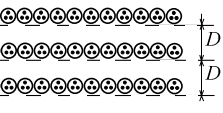
Табела 5.16.а Фактор f_5 за повеќежилни кабли, положени на тлото

Распоред на каблите (скица)	Меѓусебни растојанија	Број на каблите, положени еден покрај друг				
		1	2	3	4	5
	$d_z = 2 \text{ cm}$ $d_m = d$	0,95	0,90	0,88	0,85	0,84
	$d_z = 0$ $d_m = 0$	0,90	0,84	0,80	0,75	0,73

Табела 5.16.б Фактор f_5 за повеќежилни кабли, положени на прегради (циркулацијата на воздухот е спречена)*

Распоред на каблите (скица)	Меѓусебни растојанија	Број на прегради	Број на каблите, положени еден крај друг				
			1	2	3	6	9
	$d_z \geq 2 \text{ cm}$ $d_m = d$ $D \approx 30 \text{ cm}$	1	0,95	0,90	0,88	0,85	0,84
		2	0,90	0,85	0,83	0,81	0,80
		3	0,88	0,83	0,81	0,79	0,78
		6	0,86	0,81	0,79	0,77	0,76
	$d_z = 0$ $d_m = 0$ $D = 30 \text{ cm}$	1	0,95	0,84	0,80	0,75	0,73
		2	0,95	0,80	0,76	0,71	0,69
		3	0,95	0,78	0,74	0,70	0,68
		6	0,95	0,76	0,72	0,68	0,66

Табела 5.16.в Фактор f_5 за повеќежилни кабли, положени на решетки (циркулацијата на воздухот е слободна)**

Распоред на каблите (скица)	Меѓусебни растојанија	Број на решетки	Број на каблите, положени еден покрај друг				
			1	2	3	6	9
	$d_z \geq 2 \text{ cm}$ $d_m = d$ $D \approx 30 \text{ cm}$	1	1,00	0,98	0,96	0,93	0,92
		2	1,00	0,95	0,93	0,90	0,89
		3	1,00	0,94	0,92	0,89	0,88
		6	1,00	0,93	0,90	0,87	0,86
	$d_z = 0$ $d_m = 0$ $D = 30 \text{ cm}$	1	0,95	0,84	0,80	0,75	0,73
		2	0,95	0,80	0,76	0,71	0,69
		3	0,95	0,78	0,74	0,70	0,68
		6	0,95	0,76	0,72	0,68	0,66

Табела 5.16.г Фактор f_5 за повеќежилни кабли, поставени на носачи или прицврстени на ѕид, еден над друг^{*}**

Распоред на каблите (скица)	Меѓусебни растојанија	Број на каблите, положени еден покрај друг				
		1	2	3	6	9
	$d_z \geq 2 \text{ cm}$ $d_m = d$	1,00	0,93	0,90	0,87	0,86
	$d_z = 0$ $d_m = 0$	0,95	0,78	0,73	0,68	0,66

Забелешки:

Одделните ознаки во табелите 5.16 а 5.16 г ги имаат следните значења:

- * d_z = растојание од ѕидот до кабелот;
 d_m = растојание помеѓу секои два соседни кабла;
 D = вертикално растојание помеѓу две соседни прегради (решетки).
- ** Кога каблите се поставени на кабелски решетки кои овозможуваат слободна циркулација на воздухот, при што е $d_z > 2 \text{ cm}$, $d_m > 2 \cdot d$ и $D > 30 \text{ cm}$, факторот $f_5 = 1$ без оглед на бројот на решетките и бројот на каблите на решетките.
- *** Кога каблите се поставени вертикално, еден над друг, прицврстени на куки (носачи) при што е $d_z > 2 \text{ cm}$ и $d_m > 2 \cdot d$, тогаш факторот $f_5 = 1$ без оглед на бројот на каблите, положени еден над друг.

Табела 5.17.а Фактор f_5 за кабелски системи (снопови од по три едножилни кабли, положени на земјата, еден покрај друг)

Распоред на каблите (скица)	Меѓусебни растојанија	Број на системите, положени еден покрај друг		
		1	2	3
	$d_z = 2 \text{ cm}$ $d_m = d$	0,92	0,89	0,88
	$d_z = 2 \text{ cm}$ $d_m = 2 \cdot d$	0,95	0,90	0,88

Табела 5.17.б Фактор f_5 за кабелски системи (снопови), положени на кабелски прегради (циркулацијата на воздухот е спречена)

Распоред на каблите (скица)	Меѓусебни растојанија	Број на прегради	Број на системите, положени еден покрај друг		
			1	2	3
	$d_z \geq 2 \text{ cm}$	1	0,92	0,89	0,88
	$d_m = d$	2	0,87	0,84	0,83
		3	0,84	0,82	0,81
	$D \approx 30 \text{ cm}$	6	0,82	0,80	0,79
	$d_z \geq 2 \text{ cm}$	1	0,95	0,90	0,88
	$d_m = 2d$	2	0,90	0,85	0,83
		3	0,88	0,83	0,81
	$D \approx 30 \text{ cm}$	6	0,86	0,81	0,79

Табела 5.17.в Фактор f_5 за повеќежилни кабли, положени на кабелски решетки (регали), (циркулацијата на воздух е слободна)*

Распоред на каблите (скица)	Меѓусебни растојанија	Број на прегради	Број на системите, положени еден покрај друг		
			1	2	3
	$d_z \geq 2 \text{ cm}$	1	1,00	0,97	0,96
	$d_m = d$	2	0,97	0,94	0,93
		3	0,96	0,93	0,92
	$D \approx 30 \text{ cm}$	6	0,94	0,91	0,90
	$d_z \geq 2 \text{ cm}$	1	1,00	0,98	0,96
	$d_m = 2d$	2	1,00	0,95	0,93
		3	1,00	0,94	0,92
	$D \approx 30 \text{ cm}$	6	1,00	0,93	0,90

Табела 5.17.г Фактор f_5 за кабелски системи (снопови), поставени на носачи или прицврстени на ѕид, еден над друг**

Распоред на каблите (скица)	Меѓусебни растојанија	Број на каблите, положени еден покрај друг		
		1	2	3
	$d_z \geq 2 \text{ cm}$ $d_m = d$	0,94	0,91	0,89
	$d_z = 0$ $d_m = 0$	0,89	0,86	0,84

Забелешки:

- * Кога кабелските системи се поставени на кабелски решетки (регали) при што трите едножилни кабли од снопот се поставени во триаголник и притоа $d_z > 2 \text{ cm}$ а растојанието меѓу секои два соседни снопа изнесува $d_m > 4 \cdot d$ и $D > 30 \text{ cm}$, тогаш факторот на корекција изнесува $f_5 = 1$, без оглед на бројот на системите, поставени на решетките.
- ** Кога едножилните кабли се положени во иста, вертикална, рамнина, еден над друг, при што растојанието помеѓу секои два соседни кабли изнесува $d_m > 2 \cdot d$, факторот на корекција изнесува $f_5 = 1$, без оглед на бројот на положените кабли.



Пример 5.1. Кабел од типот IPO 13 3x95 6/10 kV е положен во земја. Познати се следните податоци: должина $l = 5 \text{ km}$; подолжна импеданција $\underline{z} = (r+jx) = (0,19+j0,08) \Omega/\text{km}$. Кабелот напојува дистрибутивен конзум кој претставува трифазен симетричен потрошувач со следните карактеристики: $U_n = 10 \text{ kV}$; $P_P = 4 \text{ MW}$; $\cos \varphi_P = 0,95$. Кабелот е положен во номинални услови, на длабочина $h = 0,7 \text{ m}$ во почва со температура $\theta = 20^\circ\text{C}$ и специфична топлинска отпорност $\rho = 100 \text{ }^\circ\text{K} \cdot \text{cm}/\text{W} = 1^\circ\text{K} \cdot \text{m}/\text{W}$. Потребно е:

- а) да се утврди дали кабелот ќе биде термички преоптоварен;
- б) колкав ќе биде падот на напон ΔU (V) и $\Delta U\%$ како загубите на активна моќност во преносот ΔP (kW) и $\Delta P\%$.

Решение:

а) Проверка на термичкиот критериум

Од табела 5.8 ја отчитуваме табличната вредност на трајната дозволена струја на кабелот за номинални услови на полагање: $I_{d,T} = 255 \text{ A}$. (земја, Cu 95 mm²). Бидејќи кабелот се наоѓа во номинални услови на полагање, неговата трајно дозволена струја ќе биде $I_d = I_{d,T} = 255 \text{ A}$.

Струјата на потрошувачот I_P ќе биде:

$$S_P = \sqrt{3} \cdot U_P \cdot I_P = \sqrt{3} \cdot U_n \cdot I_P \Rightarrow I_P = \frac{S_P}{\sqrt{3} \cdot U_n} = \frac{P_P}{\sqrt{3} \cdot U_n \cdot \cos \varphi_P};$$

$$I_P = \frac{4000}{\sqrt{3} \cdot 10 \cdot 0,95} = 243,1 \text{ A}. \quad I_P < I_d \quad (243,1 \text{ A} < 255 \text{ A}).$$

Според тоа, од термички аспект, кабелот ќе го задоволи условот $I_P \leq I_d$.

б) Проверка на напонскиот критериум

Параметрите на редната гранка од заменската π -шема на кабелот ќе бидат:

$$R = r \cdot l = 0,19 \cdot 5 = 0,95 \Omega; \quad X = x \cdot l = 0,4 \Omega; \quad \underline{Z} = R + jX = (0,95 + j0,4) \Omega.$$

Бидејќи ни е позната активната моќност $P_P = 4 \text{ MW}$ на потрошувачот и неговиот фактор на моќност $\cos \varphi_P = 0,95$, добиваме:

$$S_P = \frac{P_P}{\cos \varphi_P} = \frac{4000}{0,95} = 4210,53 \text{ MVA}; \quad \underline{S}_P = (P_P + jQ_P).$$

Реактивната моќност на потрошувачот Q_P ќе биде:

$$\cos \varphi_P = 0,95; \quad \sin \varphi_P = \sqrt{1 - \cos^2 \varphi} = 0,31225; \quad Q_P = S_P \cdot \sin \varphi_P = 1315 \text{ kvar}.$$

Падот на напон во кабелот ќе биде:

$$\Delta U = \frac{P_P \cdot R + Q_P \cdot X}{U} \approx \frac{P_P \cdot R + Q_P \cdot X}{U_n} = \frac{4000 \cdot 0,95 + 1315 \cdot 0,4}{10} = 433 \text{ V} \equiv 0,433 \text{ kV},$$

$$\text{Понатаму имаме: } \Delta U \% = \frac{\Delta U}{U_n} \cdot 100 = \frac{0,433}{10} \cdot 100 = 4,33\%.$$

Загубата на моќност во кабелот за анализираниот режим ќе биде:

$$\Delta P = \frac{P_P^2 + Q_P^2}{U_n^2} \cdot R = \frac{4000^2 + 1315^2}{10^2} \cdot 0,8 = 168428 \text{ W} \equiv 168,428 \text{ kW} \text{ и}$$

$$\Delta P \% = \frac{\Delta P}{P_P} \cdot 100 = \frac{168,428}{4000} \cdot 100 = 4,21\%.$$

■ ■ ■

Пример 5.2. Да се утврди дали истиот кабел од претходниот пример ќе задоволи од термички аспект ако во кабелскиот ров, заедно со него, се постави уште еден таков кабел, на растојание $\delta = 15 \text{ cm}$ од него.

Решение:

Сега условите на полагање на кабелот се ненормални, што значи дека ќе треба да се изврши корекција на струјното оптоварување според формулата:

$$I_d = f \cdot I_{d.T}; \quad f = f_1 \cdot f_2 \cdot f_3.$$

Факторите f_1 и f_2 ќе бидат 1 ($\rho = \rho_n = 1^\circ\text{K} \cdot \text{m/W}$ и $\theta_a = 20^\circ\text{C}$). Но поради присуството на другиот кабел, факторот f_3 ќе треба да го отчитаме од табелата 5.14:

$$f_3 = 0,86; \quad f = f_1 \cdot f_2 \cdot f_3 = 1 \cdot 1 \cdot 0,86 = 0,86.$$

$$I_d = f \cdot I_{d.T} = 0,86 \cdot 255 = 219 \text{ A}.$$

Бидејќи струјата со која е оптоварен кабелот (т.е. струјата на потрошувачот) е:

$$I = I_P = 243,1 \text{ A} > I_d = 219 \text{ A},$$

произлегува дека кабелот ќе биде преотварен за околу 11% во однос на неговата трајна дозволена струја I_d . Тоа неминовно ќе се одрази врз неговиот животен век.

Ако, на пример, во извесен период од денот, кабелот работи преотварен за износ 11%, тогаш неговата надтемпература, која во нормални (номинални) услови треба да биде:

$$\Delta \theta_{\max} = \theta_{\max.T} - \theta_a = 65 - 20 = 45^\circ\text{C},$$

тогаш би била:

$$\Delta\theta = \Delta\theta_{\max} \cdot (I_P / I_d)^2 = 45 \cdot 1,11^2 = 55,4 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Според тоа температурата на кабелот ќе биде

$$\theta = \theta_a + \Delta\theta = 20 + 55,4 = 75,4 \text{ }^\circ\text{C}$$

а таа е поголема од дозволената за $10,4^\circ\text{C}$ ($75,4 - 65 = 10,4^\circ\text{C}$).

Значи кабелот во таквиот режим забрзано ќе старее, со приближно трикратна брзина, така што за секој час работа со такво преоптоварување тој ќе остарува за приближно 3 часа. На тој начин неговиот животен век може значително да се намали.

■ ■ ■

Пример 5.3. Колкава е трајно дозволената струја I_d на кабелот разгледуван во претходниот Пример 5.2 во зимски услови, кога температурата на земјата изнесува $\theta = 5^\circ\text{C}$.

Решение:

Сега е $f_1 = 1$; $f_2 = 1$ (табела 5.13) и $f_3 = 0,86$.

Значи повторно е $f = 0,86$, т.е. $I_d = f \cdot I_{dT} = 0,86 \cdot 255 = 219 \text{ A}$.

■ ■ ■

Пример 5.4. Дали истиот кабел од Примерот 5.1, поставен во номинални услови на полагање ($h = 0,7 \text{ m}$; $\theta = 20^\circ\text{C}$; $\rho = 100 \text{ }^\circ\text{K} \cdot \text{cm/W} = 1^\circ\text{K} \cdot \text{m/W}$), ќе задоволи од термички аспект ако се работи за напојување на индустриски потрошувач кој преку целиот ден ќе работи со константен товар $P_P = 3 \text{ MW}$, $\cos\varphi_P = 0,8$ $U_P = U_n = 10 \text{ kV}$.

Решение:

Кога кабелот напојува индустриски конзум, тогаш дозволеното струјно оптоварување ќе биде за 25% помало од нормираната вредност I_{dT} , отчитана од табелата 5.8. Сега, значи, ќе имаме:

$$I_d = 0,75 \cdot I_{dT} = 0,75 \cdot 255 = 191 \text{ A}.$$

Струјата I_P на потрошувачот во овој случај ќе биде:

$$I_P = \frac{S_P}{\sqrt{3} \cdot U_n} = \frac{P_P}{\sqrt{3} \cdot U_n \cdot \cos\varphi_P} = \frac{3000}{\sqrt{3} \cdot 10 \cdot 0,8} = 216 \text{ A}.$$

Бидејќи $I_P > I_d$ ($216 \text{ A} > 191 \text{ A}$), значи кабелот ќе биде термички преотоварен.

■ ■ ■

Задача 5.1. Интересно е да се утврди која е максималната активна моќност на потрошувачот (при ист фактор на моќност $\cos\varphi_P = 0,8$) за која кабелот ќе биде оптоварен точно со трајно дозволената струја за овој случај. (Решение: $P_P = 2,647 \text{ kW}$).

■ ■ ■

5.5 ДОЗВОЛЕНО СТРУЈНО ОПТОВАРУВАЊЕ НА КАБЕЛ ВО ИНТЕРМИТИРАН ПОГОН

5.5.1 Временски тек на температурата на кабелот

Да го разгледаме процесот на загревање/ладење на енергетските кабли во нестационарен режим кога тие работат со променливо оптоварување. Со θ ќе ја означиме температурата на кабелот во произволен момент t ($t \geq 0$) а со θ_a ќе ја означиме амбиентната температура на околината (медиумот) во којашто е поставен кабелот. Нека температурата на кабелот во моментот $t = 0$ изнесува θ_0 и нека со I го означиме струјното оптоварување на кабелот во периодот $t \geq 0$. Во општ случај промената на температурата θ со времето ќе се одвива по следниот закон [5]:

$$\theta(t) = \theta_a + (\theta_\infty - \theta_a) \cdot (1 - e^{-t/\tau}) + (\theta_0 - \theta_a) \cdot e^{-t/\tau} \quad (5.13)$$

Во релацијата (5.13) со θ_∞ е означена конечната температура која кабелот ќе ја постигне после теориски бесконечно време додека со τ е означена временската константа на загревање на кабелот.

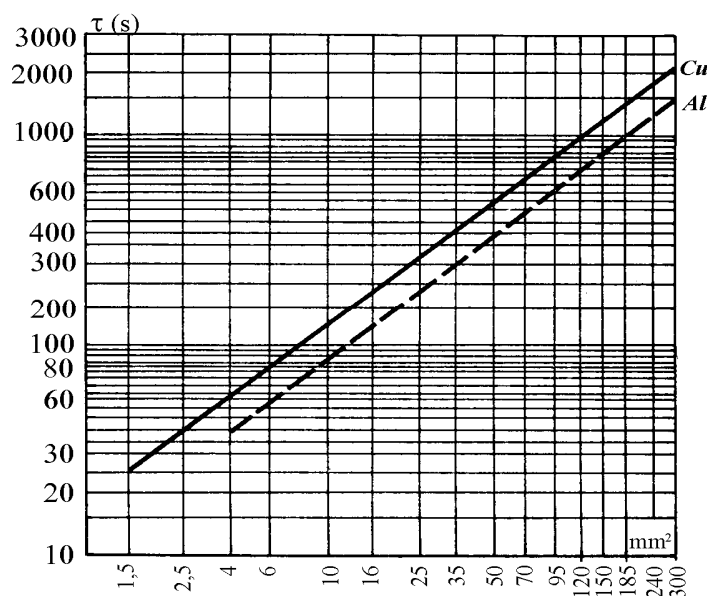
Разликата $\theta - \theta_a$ помеѓу температурите на кабелот и на околната средина се нарекува *надтемпература* на кабелот:

$$\Delta \theta = \theta - \theta_a \quad (5.14)$$

Сега релацијата (5.13) можеме да ја напишеме и на следниот начин:

$$\begin{aligned} \Delta \theta_\infty &= \theta_\infty - \theta_a; \quad \Delta \theta_0 = \theta_0 - \theta_a; \\ \Delta \theta(t) &= \Delta \theta_\infty \cdot (1 - e^{-t/\tau}) + \Delta \theta_0 \cdot e^{-t/\tau} \end{aligned} \quad (5.15)$$

Временската константа на загревање на кабелот τ зависи од материјалот од којшто се изработени спроводниците, нивниот пресек и условите на ладење (т.е. конструкцијата на кабелот). Ориентационата вредност на константата τ за НН и СН кабли, со номинален напон до 10 kV, можат да се отчитаат од дијаграмот, прикажан на слика 5.3.

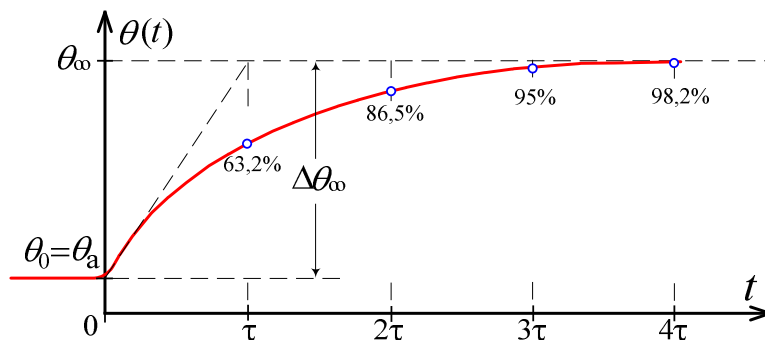


Сл.5.3. Зависност на временската константа τ од пресекот A на кабелот

Кабел положен во средина чија температура изнесува θ_a и долго време струјно неоптоварен, ја прима температурата на околината, така што $\theta(0) = \theta_0 = \theta_a$. Ако кабелот го оптовариме со струја I која има константна ефективна вредност, тогаш во кабелот ќе започне да се ослободува топлина и неговата температура θ (или поточно речено температурата на спроводниците од кабелот), постепено ќе почне да расте. Но сега, бидејќи е $\Delta\theta_0 = \theta_0 - \theta_a = 0$, релацијата (5.13) се трансформира во релацијата (5.16) и порастот на температурата на кабелот ќе се одвива по следниот закон:

$$\theta(t) = \theta_a + (\theta_\infty - \theta_a) \cdot (1 - e^{-t/\tau}) \quad (5.16)$$

Зависноста $\theta(t)$ во овој случај е графички прикажана на сликата 5.4.



Слика 5.4. Пораст на температурата на кабел оптоварен со константна струја

Анализирајќи ја релацијата (5.16) и сликата 5.4, може да се заклучи дека надтемпературата на кабелот во почетокот расте најбрзо, скоро линеарно со времето, а подоцна ќе расте сè поспоро и поспоро (види табела 5.18), така што теориски гледано, дури после бесконечно долго време (а практично само после 3 до 4 временски константи на загревање τ), таа ќе ја достигне својата конечна вредност $\Delta\theta_\infty = \theta_\infty - \theta_a$.

Зависноста $\Delta\theta = \Delta\theta(t)$ во табеларна форма е дадена во табелата 5.18.

Табела 5.18 Временска зависност на надтемпературата $\Delta\theta(t)$ на кабел оптоварен со константна струја

t/τ	0,0	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0
$\Delta\theta/\Delta\theta_\infty$	0,000	0,393	0,632	0,777	0,865	0,918	0,950	0,970	0,982

Од табелата 5.18 можеме да заклучиме дека после истекот на времето $t = 3 \cdot \tau$ надтемпературата на кабелот $\Delta\theta$ ќе достигне 95% од својата конечна вредност. Во тој момент ние ќе можеме да сметаме дека процесот на загревањето на кабелот практично завршил (се стационарирал) и дека температурата на кабелот θ ја достигнала својата стационарна вредност θ_∞ .

Од изразот (5.6) можеме да заклучиме дека надтемпературата $\Delta\theta_\infty$ што ќе ја добие кабелот во стационарен режим на работа е пропорционална на квадратот на струјата I со која е оптоварен кабелот, т.е. :

$$\Delta\Delta\theta_\infty = K \cdot I^2. \quad (5.17)$$

Вредноста на константата на пропорционалност K_T од (5.17), за номинални услови на полагање на еден кабел, најлесно може да се определи со помош на неговата трајно дозволена струја $I_{d,T}$, отчитана од табелите 5.2... 5.9, со која во условите на полагање на кабелот, опишани во точките 5.2 и 5.3, се постигнува максималната дозволена надтемпература $\Delta\theta_{\max,T} = \theta_{\max,T} - \theta_{a,T}$, бидејќи, според релацијата (5.17), ќе важи:

$$\Delta\theta_{\max,T} = K_T \cdot I_{d,T}^2 \quad (5.18)$$

Од последната равенка добиваме:

$$K_T = \frac{\Delta\theta_{\max,T}}{I_{d,T}^2} = \frac{\theta_{\max,T} - \theta_{a,T}}{I_{d,T}^2} \quad (5.19)$$

За некои други услови на полагање, коишто се разликуваат од номиналните, константата K ќе се разликува од K_T и ќе изнесува

$$K = \frac{\Delta\theta_{\max,T}}{I_d^2} = \frac{\theta_{\max,T} - \theta_a}{I_d^2} \quad (5.19.a)$$

каде што $\theta_{\max,T}$ е максималната дозволена температура на кабелот (според таб. 5.1), θ_a е актуелната амбиентна температура а I_d е трајно дозволена струја ($I_d = f \cdot I_{d,T}$) при што корекциониот фактор f се определува според (5.10) односно (5.11).

Заминувајќи ја вредноста за K од релацијата (5.19.a) во релацијата (5.17), во општ случај, за стационарната вредност на надтемпературата $\Delta\theta_\infty$ на кабелот се добива:

$$\Delta\theta_\infty = \Delta\theta_{\max,T} \cdot (I/I_d)^2 = (\theta_{\max,T} - \theta_a) \cdot (I/I_d)^2 \quad (5.20)$$

□ □ □

Пример бр. 5.5. Појасен кабел тип IPO 13 3x150 6/10 kV е положен во земја на длабочина 70 cm. Температурата на земјата на таа длабочина изнесува $\theta_a = 20^\circ\text{C}$. Кабелот бил долго време неоптоварен така што неговата почетна температура исто така изнесува $\theta_0 = 20^\circ\text{C}$. Временската константа на загревање на кабелот изнесува $\tau = 20 \text{ min}$. Да се пресмета:

- а) Колкава ќе биде стационарната температура на кабелот θ_∞ ако трајно го оптовариме со струја $I = 250 \text{ A}$;
- б) Колкава ќе биде температурата θ_{30} на кабелот во тој случај после $t = 30 \text{ min}$, сметано од моментот кога е тој струјно оптоварен.

Решение

а) *Пресметка на стационарната температура θ_∞ .*

Максималната дозволена температура во траен погон на 10 kV појасни кабли со изолација IP, според табелата 5.1 изнесува $\theta_{\max,T} = 65^\circ\text{C}$. Од табелата 5.8 ја отчитуваме трајно дозволена струја на кабелот $I_{d,T}$ со која, во услови кога температурата на амбиентот (плото) изнесува $\theta_{a,T} = 20^\circ\text{C}$, се постигнува температурата на кабелот да ја достигне својата максимално дозволена вредност $\theta_{\max,T}$. Според тоа, добиваме:

$$I_{d,T} = 325 \text{ A} - \text{отчитано од табелата 5.8,}$$

$$\theta_{\max,T} = 65^\circ\text{C} - \text{отчитано од табелата 5.1}$$

$$\Delta\theta_{\max,T} = \theta_{\max,T} - \theta_{a,T} = 65 - 20 = 45^\circ\text{C}.$$

Со помош на (5.18) ќе ја добиеме надтемпературата $\Delta\theta$ на кабелот во траен погон кога е тој оптоварен со струјата $I = 250 \text{ A}$:

$$K = \frac{\Delta\theta_{\max,T}}{I_d^2} = \frac{\theta_{\max,T} - \theta_a}{I_d^2}$$

$$\Delta\theta_\infty = \Delta\theta_{\max,T} \cdot (I / I_{d,T})^2$$

$$\Delta\theta_\infty = 45 \cdot (250/325)^2 = 26,6^\circ\text{C}.$$

Според тоа, стационарната температура на кабелот θ_∞ во овој режим ќе биде:

$$\theta_\infty = \theta_a + \Delta\theta_\infty = 20 + 26,6 = 46,6^\circ\text{C}.$$

б) Пресметка на температурата θ_{30} во $t = 30 \text{ min}$.

Температурата што ќе ја достигне кабелот после 30 минути, ќе ја пресметаме со помош на релацијата (5.13):

$$\theta_{30} = \theta_a + (\theta_\infty - \theta_a) \cdot (1 - e^{-30/20}) + (\theta_0 - \theta_a) \cdot e^{-30/20} = 20 + (46,6 - 20) \cdot (1 - e^{-1,5}) + 0 = 40,7^\circ\text{C}.$$

■ ■ ■

Пример бр. 5.6. Се посматра истиот кабел од претходниот пример. Температурата на амбиентот изнесува $\theta = 20^\circ\text{C}$. Кабелот долго време не бил струјно оптоварен, така што може да се смета дека неговата температура истотака изнесува $\theta_0 = \theta_a = 20^\circ\text{C}$.

Во моментот $t = 0$ кабелот се оптоварува со константна струја $I = 400 \text{ A}$ којашто е поголема од неговата трајно дозволена струја. После колку време температурата на кабелот ќе ја достигне својата максимално дозволена вредност $\theta_{\max,T} = 65^\circ\text{C}$?

Решение :

Најнапред, со помош на релацијата (5.18) ќе ја определиме стационарната вредност на надтемпературата на кабелот $\Delta\theta_\infty$ во траен погон:

$$\Delta\theta_\infty = \Delta\theta_{\max,T} \cdot (I / I_{d,T})^2 = 45 \cdot (400/325)^2 = 68,2^\circ\text{C} ,$$

од каде што се добива и стационарната температура на кабелот:

$$\theta_\infty = \theta_a + \Delta\theta_\infty = 20 + 68,2 = 88,2^\circ\text{C} .$$

Времето t после кое температурата на кабелот ќе ја достигне вредноста $\theta_{\max,T} = 65^\circ\text{C}$ ќе го добиеме со помош на релацијата (5.13)

$$65 = 20 + (88,2 - 20) \cdot (1 - e^{-t/\tau}) \Rightarrow e^{-t/\tau} = 1 - \frac{65 - 20}{88,2 - 20} = 0,34$$

$$t = \tau \cdot \ln\left(\frac{1}{0,34}\right) = 1,078 \cdot \tau \text{ или } t = 21,6 \text{ min}.$$

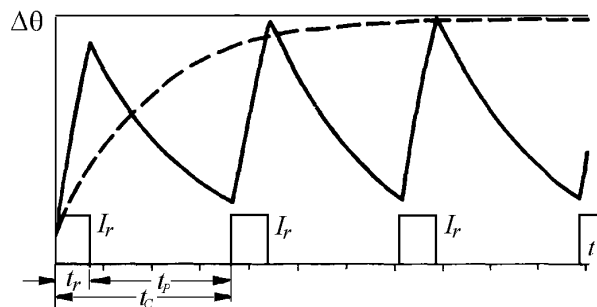
■ ■ ■

5.5.2 Доволно преоптоварување на кабелот при интермитиран погон

Од примерот 5.6 заклучуваме дека еден кабел може да работи извесно кратко време и со струја која е поголема од неговото трајно дозволно струјно оптоварување, без да се надмине пропишаната максимална дозволена температура на кабелот $\Delta\theta_{\max.T}$.

a) *Случај кога паузата трае доволно долго*

Да го посматраме сега случајот кога кабелот циклично работи извесно време t_r преоптоварен, со константна струја $I_r = I$, којашто е поголема од максималната трајна дозволена струја на кабелот I_d , после кое настапува подолг период на пауза t_p ($t_p > 3\tau$) во кој кабелот струјно не е оптоварен ($I_r = 0$) и трае доволно долго така што кабелот целосно ќе се излади и ќе ја прими амбиентната температура (слика 5.5).



Слика 5.5 Циклично работење на кабелот во интермитиран погон

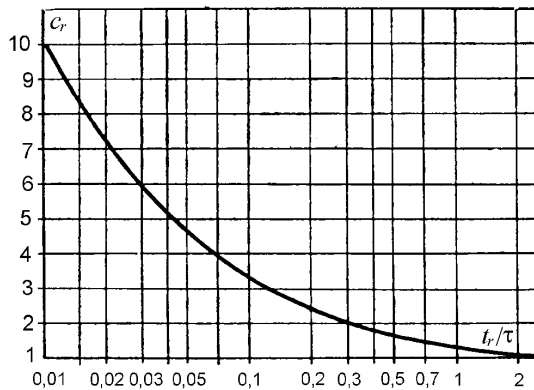
Се поставува прашањето колкав смее да биде факторот на преоптоварување на кабелот $c_r = I_r/I_d$ во периодот кога е тој преоптоварен, така што температурата на кабелот нема да ја надмине пропишаната максимална дозволена температура $\theta_{\max.T}$.

Врз основа на релацијата (5.15) можеме да пишуваме:

$$\Delta\theta(t_r) = \Delta\theta_{\infty} \cdot (1 - e^{-t_r/\tau}) = (\theta_{\max.T} - \theta_a) \cdot (1 - e^{-t_r/\tau}) \quad (5.21)$$

Со замена на (5.20) во (5.21) се добива:

$$\Delta\theta(t_r) = \Delta\theta_{\max.T} \cdot (I/I_d)^2 \cdot (1 - e^{-t_r/\tau}). \quad (5.22)$$



Слика 5.6 Зависност на факторот c_r од односот t_r/τ

Потоа, од условот:

$$t = t_r \Rightarrow \Delta\theta(t_r) = \Delta\theta_{\max.T} \quad (5.23)$$

добиваме:

$$(I/I_d)^2 \cdot (1 - e^{-t_r/\tau}) = 1, \quad (5.24)$$

од каде се добива бараниот *фактор на преоптоварување* c_r (слика 5.6):

$$c_r = \frac{I}{I_d} = \frac{1}{\sqrt{1 - e^{-t_r/\tau}}}. \quad (5.25)$$

б) *Случај кога паузата не е доволна за целосно ладење на кабелот*

Кога периодот на пауза t_p не е доволно долг за да може кабелот целосно да се излади како во претходниот случај, струјното оптоварување на кабелот за време на работењето ќе биде помала. Може да се докаже дека факторот на преоптоварување во овој случај, наместо со изразот (5.25), ќе се пресметува со помош на изразот (5.26.а).

$$c_r = \frac{I}{I_d} = \frac{\sqrt{1 - e^{-(t_r+t_p)/\tau}}}{\sqrt{1 - e^{-t_r/\tau}}} \quad (5.26.a)$$

Во случаите кога временската константа на загревање/ладење на кабелот е значително поголема од времињата на работа и пауза (t_r и t_p) за пресметување на факторот на преоптоварување c_r ќе може да се користи изразот (5.26.б):

$$c_r = \frac{I}{I_d} = \sqrt{\frac{t_r+t_p}{t_r}} = \sqrt{\frac{t_c}{t_r}} \quad (5.26.б)$$

□ □ □

Пример бр. 5.7. Се посматра повторно кабелот од Примерот 5.5. ($I_d = 325$ А, $\tau = 20$ min). Да се пресмета максимално дозволената струја $I_{r,max}$ за време на работењето на кабелот во интермитираниот погон ако времето на работа изнесува $t_r = 20$ min додека времето на пауза изнесува $t_p = 70$ min, а целиот циклус трае $t_c = t_r + t_p = 20+70 = 90$ min.

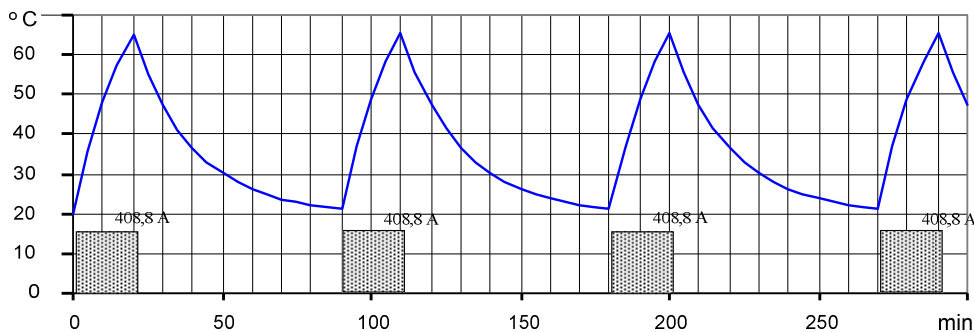
Решение:

Врз основа на релацијата (5.25), за факторот на преоптоварување на кабелот добиваме:

$$c_r = \frac{I_{r,max}}{I_d} = \frac{1}{\sqrt{1 - e^{-t_r/\tau}}} = \frac{1}{\sqrt{1 - e^{-20/20}}} = 1,258; \Rightarrow I_{r,max} = 1,258 \cdot 325 = 408,8 \text{ А.}$$

Значи ако кабелот го оптовариме во периодот на работењето t_r со струја $I_r = I_{r,max} = 408,8$ А, максималната температура на кабелот на крајот на работниот циклус би требало да ја достигне максимално дозволената вредност $\theta_{max,T} = 65^\circ\text{C}$.

На сликата П.5.7.1 е прикажан временскиот тек на процесите на загревање и ладење на кабелот за случајот кога кабелот спроведува струја $I_r = I_{r,max} = 408,8$ А, пресметан со помош на општата релација (5.25).



Слика П.5.7.1 Временски тек на промената на темпаратурата на кабелот

Забележуваме дека најголемата и најмалата температура што се достигнуваат на крајот и пред почетокот на работните циклуси изнесуваат $\theta_{\max} = 65,5 \text{ }^\circ\text{C}$ и $\theta_{\min} = 21,7 \text{ }^\circ\text{C}$ – респективно. Малата разлика во добиениот резултат за θ_{\max} во споредба со $\theta_{\max,T}$ се должи на фактот што во периодот на паузата, којшто трае $t_p = 70 \text{ min}$, кабелот не успева целосно да се излади и да ја прими амбиентната температура од 20°C .

■ ■ ■

Пример бр. 5.8. За случајот анализиран во претходниот Пример да се определи временскиот тек на процесите на загревање и ладење на кабелот за случајот кога во работниот период t_r кабелот спроведува струја $I_r = 450 \text{ A}$. Колкава ќе биде максималната работна температура на кабелот што се достигнува на крајот на секој работен циклус.

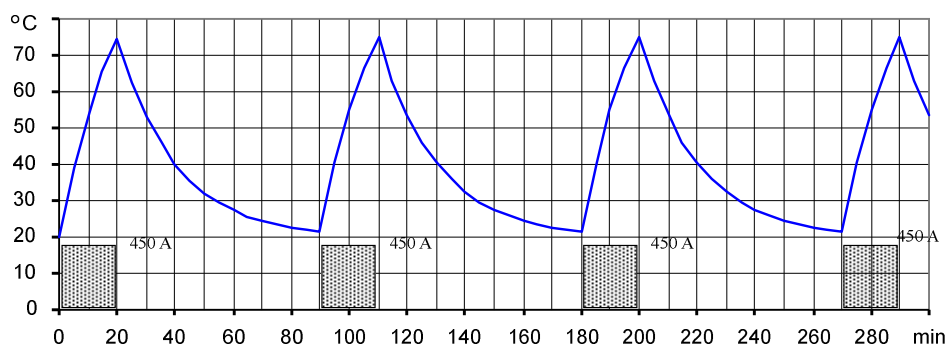
Решение:

Со помош на општатата релација (5.13)

$$\theta(t) = \theta_a + (\theta_\infty - \theta_a) \cdot (1 - e^{-t/\tau}) + (\theta_0 - \theta_a) \cdot e^{-t/\tau}$$

се врши пресметка на временскиот тек $\theta(t)$ на работната температура на кабелот. Притоа се добиваат следните резултати: $\theta_{\max} = 75,1^\circ\text{C}$ и $\theta_{\min} = 21,7^\circ\text{C}$.

На сликата П.5.8.1 е прикажан самиот временски тек на промената $\theta(t)$.



Слика П.5.8.1 Зависност $\theta(t)$ при циклично работење на кабелот во интермитиран погон

■ ■ ■

Пример бр. 5.9. Кабелот од примерот 5.5 напојува индустриски погон којшто со циклично пвоторување работи $t_r = 4 \text{ min}$ после кое што следува пауза од $t_p = 4 \text{ min}$. Да се пресмета факторот на преоптовање c_r за овој случај и да се определи временскиот тек на процесите на загревање и ладење на кабелот за случајот кога во работниот период t_r кабелот спроведува струја еднаква на максималната дозволена струја $I_{r,\max}$.

Решение

Целиот циклус на загревање и ладење на кабелот ќе трае $t_c = t_r + t_p = 4 + 4 = 8 \text{ min}$. Со помош на општатата релација (5.26.a) ќе добиеме:

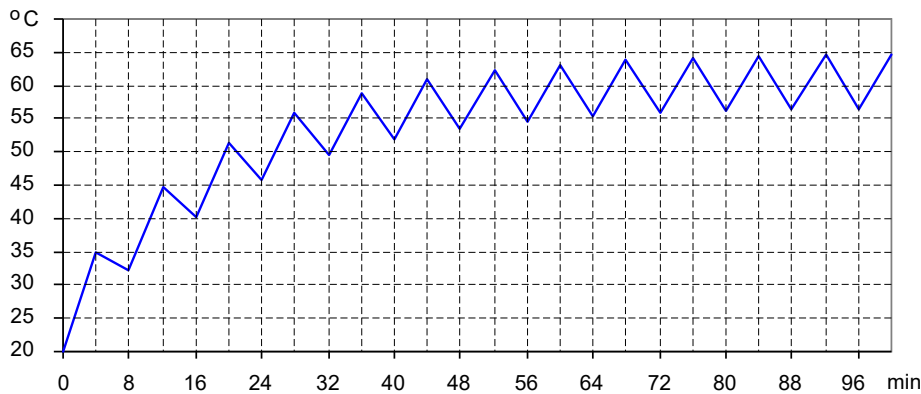
$$c_r = \frac{\sqrt{1 - e^{-t_c/\tau}}}{\sqrt{1 - e^{-t_r/\tau}}} = \frac{\sqrt{1 - e^{-8/4}}}{\sqrt{1 - e^{-4/4}}} = 1,349.$$

Значи, кабелот кој во стационарен режим на работа може да биде оптоварен со струја од најмногу $I_d = 325$ А, сега ќе може да се оптовари со струја

$$I_{r.\max} = c_r \cdot I_d = 1,349 \cdot 325 = 438,3 \text{ А.}$$

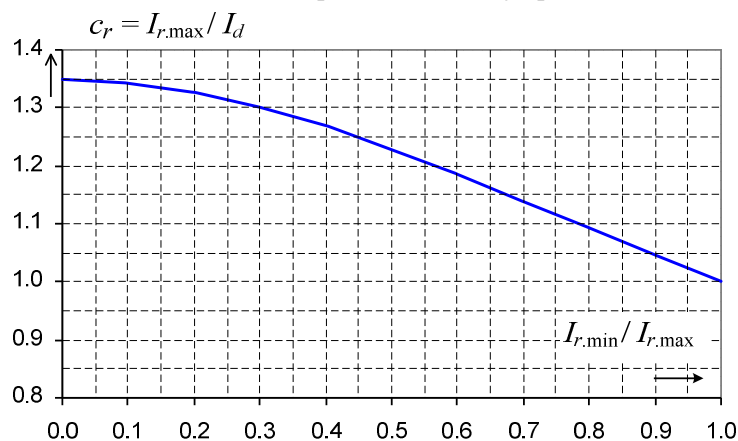
Доколку тргнувајќи од условот $\theta(0) = \theta_a = 20^\circ\text{C}$, со помош на општатата релација (5.13) извршиме пресметка на временскиот тек $\theta(t)$ на работната температура на кабелот за време на неговиот интермитиран погон, за минималната и максималната температура во „стационарниот период“ ќе добиеме: $\theta_{\max} = 65,0^\circ\text{C}$ и $\theta_{\min} = 56,8^\circ\text{C}$.

На сликата П.5.9.1 е прикажан самиот временски тек на промената $\theta(t)$.



Слика П.5.9.1 Работа на кабелот во интермитиран погон со $t_r = 4$ min и $t_p = 4$ min.

Напомена: Пресметаната вредност $I_{r.\max} = 438,3$ А важи за случајот кога во периодот на паузата t_p струјата во кабелот е еднаква на нула. Но доколку таа не е нула, ладењето на кабелот во периодот t_p ќе биде помалку интензивно поради што струјата $I_{r.\max}$ со која ќе можеме да го оптовариме кабелот во периодот на работа ќе биде помала. Со пресметки се покажува, на пример, дека ако во периодот t_p струјата во кабелот изнесува 60% од работната струја во периодот t_r , т.е. $I = I_{r.\min} = 0,6 \cdot I_{r.\max}$, тогаш максималната работна струја со која што ќе смее да се оптовари кабелот ќе изнесува $I_{r.\max} = 385$ А наместо претходно пресметаната вредност 438,3 А, а тоа изнесува само $1,185 \cdot I_d$. На таков начин се определени вредностите на мах. дозволена работна струја $I_{r.\max}$ на кабелот за разни односи $I_{r.\min} / I_{r.\max}$. Резултатите од оваа анализа се прикажани на дијаграмот од сликата П.5.9.2.



Слика П.5.9.2 Зависност на максималната дозволена струја $I_{r.\max}$ од односот $x = I_{r.\min} / I_{r.\max}$ во интермитиран погон ($t_r = 4$ min и $t_p = 4$ min) кога е кабелот оптоварен со струја $I_{r.\min}$ во периодот t_p .



5.6 РЕЛАТИВНО СТАРЕЕЊЕ И ТОПЛИНСКА ИСТРОШЕНОСТ НА ИЗОЛАЦИЈАТА НА ЕНЕРГЕТСКИТЕ КАБЛИ

За изолираните спроводници и кабли дозволените температури на спроводниците не претставуваат единствен критериум за определувањето на нивната пропусна способност (моќ). За таа цел ќе треба да се земе предвид уште и брзината на стареењето на самата изолација во погонот, која, пак, зависи од термичките напрегања на кои таа ќе биде изложена во текот на својата работа. Со други зборови кажано, треба да се земе предвид и топлинската истрошеност на изолацијата на кабелот.

Рокот на служба (траење) односно животниот век на изолацијата е неопределена величина. Затоа за проценка на векот на траењето на еден кабел позгодно да се користиме со поимот *релативна истрошеност* на изолацијата λ . Релативната истрошеност на еден кабел се добива преку споредба на фактичката истрошеност на изолацијата од кабелот со нејзината нормална истрошеност која што соодветствува на истрошеноста на истата таа изолација што би се остварила кога кабелот е поставен во номинални услови и е оптоварен со својата номинална трајно дозволена струја. Релативната истрошеност на изолацијата на еден кабел ја дефинира всушност брзината на неговото стареење.

Бидејќи при променливиот дијаграм на траење на оптоварување во часовите на малите оптоварувања температурата на спроводниците ќе биде помала од нормалната, тогаш брзината на стареење на кабелот (т.е. неговата релативна истрошеност) во овие часови исто така ќе биде помала од нормалната. Затоа за да се постигне целосно или потполно искористување на изолацијата можно е во часовите на големите оптоварувања кабелот донекаде и да се преоптовари. Вкупната истрошеност при тоа може да остане иста со онаа што би се остварила во номинални услови на работа.

Релативната истрошеност λ на изолацијата е, значи, однос помеѓу вистинскиот животен век што таа ќе го помине со наметнатото темпо на работа во погонот и нејзиниот нормалниот животен век. Таа во најголема мера зависи од работната температура θ , т.е. од температура на кабелот со која што тој работи. Поточно кажано, релативната истрошеност λ зависи од разликата помеѓу работната температура θ и максималната дозволена температура $\theta_{\max.T}$ на самата изолација. Може да се пресмета со помош на следниот израз:

$$\lambda = \exp[a \cdot (\theta - \theta_{\max.T})] = e^{a \cdot (\theta - \theta_{\max.T})}. \quad (5.27)$$

Во последната релација со θ е означена работната температура на кабелот, со $\theta_{\max.T}$ е означена максималната дозволена температура на самата изолација (табела 5.1) додека a претставува коефициент којшто зависи од типот и класата на самата изолација.

За изолацијата од импрегнирана хартија може да се применува т.н. „шестостепенно правило“, кое го вели следното: при зголемување на температурата за 6°C над дозволената температура на изолацијата, топлинската истрошеност на изолацијата (нејзиното стареење) се забрзува за два пати.

Од ова правило произлегува дека вредноста на коефициентот изнесува $a = 0.115$. За груби пресметки шестостепеното правило може да се примени и кај каблите со други видови изолација.

Позгодно е ако „шестостепеното“ правило да се изразува на следниот начин:

$$\lambda = 2^{\frac{\theta - \theta_{\max.T}}{6}}. \quad (5.28)$$

На пример за кабел за кој е $\theta_{\max.T} = 80^\circ\text{C}$, кога тој работи со температура $\theta = 83^\circ\text{C}$, релативната истрошеност на неговата изолација за време на погонот ќе изнесува:

$$\lambda = 2^{\frac{83-80}{6}} = 2^{0,5} = 1,41.$$

Значи, во периодот кога кабелот ќе работи со оваа температура брзината на неговото стареење ќе биде поголема од нормалната за 41%. Или, кажано со други зборови, за секој поминат работен саат со температура $\theta = 83^\circ\text{C}$ кабелот остарува за 1,41 часови.

$$\lambda_0 = 2^{\frac{83-80}{6}} = 2^{\frac{1}{2}} = 1,41$$

Обратно, кога кабелот е подоптоварен така што неговата работна температура θ е помала од трајно дозволената $\theta_{\max.T}$, тогаш брзината на стареење на неговата изолација ќе биде под нормалната и таквиот кабел би требало да има подолг животен век од ист таков кабел кој ќе биде струјно повеќе оптоварен. Така, на пример, за време на периодот од Δt часови кога кабелот работи со температура $\theta = 77^\circ\text{C}$, релативната истрошеност λ во тој период ќе биде:

$$\lambda = 2^{\frac{77-80}{6}} = 2^{-0,5} = 0,71.$$

што значи дека за тие Δt часови работење кабелот ќе остари само $0,71 \cdot \Delta t$ часови.

Кога кабелот работи со променлив дијаграм на оптоварување којшто може да се подели на определен број n временски подинтервали: $\Delta t_1, \Delta t_2, \Delta t_j, \dots, \Delta t_n$, релативната истрошеност на изолацијата што ќе се оствари за време на посматраниот период $T = \sum \Delta t_i$, ќе биде:

$$\lambda_{ek} = \frac{\lambda_1 \cdot \Delta t_1 + \lambda_2 \cdot \Delta t_2 + \dots + \lambda_n \cdot \Delta t_n}{\Delta t_1 + \Delta t_2 + \Delta t_3 + \dots + \Delta t_n} = \frac{\sum_j \lambda_j \cdot \Delta t_j}{\sum_j \Delta t_j}. \quad (5.29)$$

Во последната равенка со λ_j ($j = 1, n$), се означени вредностите на релативните истрошености на изолацијата во одделните временски интервали Δt_j .

Релативната истрошеност λ_j во j -тиот интервал се добива со помош на релацијата (5.28) во која фигурира работната температура θ_j на тој интервал. Оваа температура се пресметува врз основа на: познатата амбиентна температура θ_a , познатата дозволена температура на изолацијата $\theta_{\max.T} = \theta_a + \Delta \theta_{\max.T}$ (табела 5.1), познатата струја I_j во тој интервал и номиналната (табличната) трајна дозволена струја на кабелот $I_{d.T}$ (релација 5.9), со помош на следната релација:

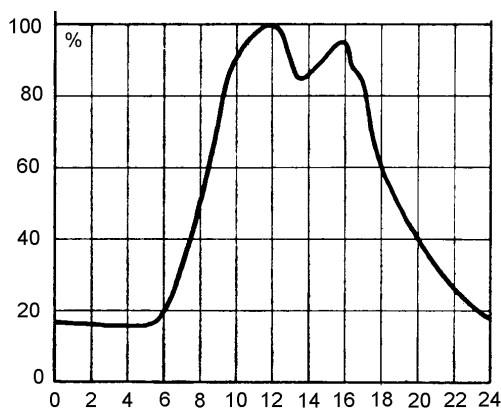
$$\theta_j = \theta_a + \Delta \theta_j = \theta_a + \Delta \theta_{\max.T} \cdot (I_j / I_{d.T})^2. \quad (5.30)$$

Во практиката, при димензионирањето на кабелските мрежи, плоштините на напречните пресеци на спроводниците од каблите обично се избираат само според продолжителното (получасовно) оптоварување, не земајќи ги предвид изразите за

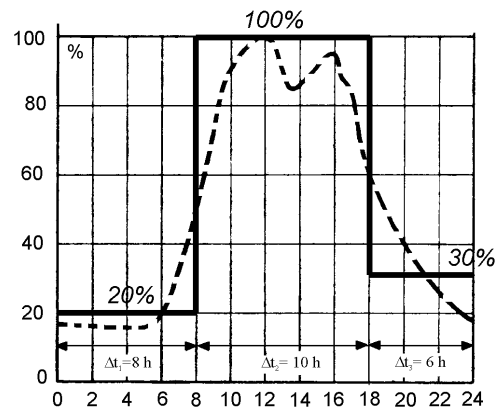
топлинска истрошеност на изолацијата. Од тука произлегува дека со таквиот избор на плоштината на напречниот пресек на спроводниците од енергетските кабли сумарната топлинска истрошеност на изолацијата на каблите ќе биде $\lambda_{ek} < 1$, т.е. стареењето на изолацијата се забавува и каблите најчесто остануваат недоискористени.

□ □ □

Пример бр. 5.10. Четирижилен нисконапонски (НН) кабелски извод од типот РР00 А 4×95 0,6/1 kV напојува станбена зграда. Кабелот е положен во кабелски ров, директно во земјата, на длабочина $h = 0,7$ m. Специфичната топлинска отпорност на земјата изнесува $\rho = 1$ K·m/W. Во зимски услови, кога настапува врвното оптоварување на конзумот, температурата на земјата (амбиентот) изнесува $\theta_a = 10^\circ\text{C}$.



Слика П.5.10.1.



Слика П.5.10.2.

Во режимот на максимално оптоварување (режим кога кабелот струјно е најмногу оптоварен) сумарното едновремено врвно оптоварување на кабелот изнесува 120 kW; $\cos\varphi = 0,97$ ($I_{\max} = 178,6$ A). Да се направи проценка на релативната истрошеност на кабелот во текот на еден ден. Дневниот дијаграм на оптоварувањето на овој кабел по својот облик се совпаѓа со обликот на типичниот дијаграм на оптоварување за градските подрачја, прикажан на сликата П.5.10.1. Тој може да се апроксимира со кривата од слика П.5.10.2, прикажана со искршена полна линија.

За предметниот кабел (РР00 А 4×95 0,6/1 kV) ќе имаме:

Таблична трајно дозволена струја (табела 5.2): $I_{d,T} = 215$ A;

Вистинска трајна дозволена струја ($\theta_a = 10^\circ\text{C} < \theta_{a,T} = 20^\circ\text{C}$): $I_d = 1,1 \cdot I_{d,T} = 239,5$ A;

Таблична максимална дозволена температура (табела 5.1): $\theta_{\max,T} = 70^\circ\text{C}$;

Таблична вредност на температурата на амбиентот (табела 5.1): $\theta_{a,T} = 20^\circ\text{C}$;

Температура на амбиентот (актуелна вредност): $\theta_a = 10^\circ\text{C}$;

Максимална вредност на струјата на оптоварување на кабелот: $I_{\max} = 178,6$ A.

Според изложеното, дневниот дијаграм на оптоварување можеме да го поделеме на три временски интервали: 1) од 0:00 до 8:00 h; 2) од 8:00 до 18:00 h и 3) од 18:00 до 24:00 h. За секој од споменатите временски интервали ја пресметуваме работната температура на кабелот:

1) Прв временски интервал: $\Delta t_1 = 8 \text{ h}$; $I_1 = 0,2 \cdot I_{\max} = 35,7 \text{ A}$;

$$\Delta \theta_1 = (\theta_{\max, T} - \theta_{a, T}) \cdot (I_1 / I_{d, T})^2 = (70 - 20) \cdot (37,5 / 215)^2 = 1,5^\circ \text{C}; \theta_1 = \theta_a + \Delta \theta_1 = 11,5^\circ \text{C};$$

2) Втор временски интервал: $\Delta t_2 = 10 \text{ h}$; $I_2 = 1,0 \cdot I_{\max} = 178,7 \text{ A}$;

$$\Delta \theta_2 = (\theta_{\max, T} - \theta_{a, T}) \cdot (I_2 / I_{d, T})^2 = (70 - 20) \cdot (178,7 / 215)^2 = 34,5^\circ \text{C}; \theta_2 = \theta_a + \Delta \theta_2 = 44,5^\circ \text{C};$$

3) Трет временски интервал: $\Delta t_3 = 6 \text{ h}$; $I_3 = 0,3 \cdot I_{\max} = 53,6 \text{ A}$;

$$\Delta \theta_3 = (\theta_{\max, T} - \theta_{a, T}) \cdot (I_3 / I_{d, T})^2 = (70 - 20) \cdot (53,6 / 215)^2 = 3,1^\circ \text{C}; \theta_3 = \theta_a + \Delta \theta_3 = 13,1^\circ \text{C};$$

Понатаму, за брзината на стареење на кабелот во одделните временски интервали ќе добиеме:

$$\lambda_1 = 2 \frac{\theta_1 - \theta_{a, T}}{6} = 2 \frac{11,5 - 70}{6} = 0,00116;$$

$$\lambda_2 = 2 \frac{\theta_2 - \theta_{a, T}}{6} = 2 \frac{44,5 - 70}{6} = 0,0528;$$

$$\lambda_3 = 2 \frac{\theta_3 - \theta_{a, T}}{6} = 2 \frac{13,1 - 70}{6} = 0,0014.$$

$$\lambda_{ek} = \frac{\lambda_1 \cdot \Delta t_1 + \lambda_2 \cdot \Delta t_2 + \lambda_3 \cdot \Delta t_3}{\Delta t_1 + \Delta t_2 + \Delta t_3} = \frac{0,00116 \cdot 8 + 0,0528 \cdot 10 + 0,0014 \cdot 6}{8 + 10 + 6} = 0,02274.$$

Бидејќи е $\lambda_{ek} \ll 1$, следува дека кабелот воопшто не е термички искористени. Значи тој може до извесна мера да се дооптовари и со струја किјашто вредност ќе биде поголема дури и од неговата трајно дозволена струја $I_d = 239,5 \text{ A}$ без тоа да му го намали неговиот животен век.



Пример 5.11. Со кое струјно оптоварување I_{\max} смееме во режимот на максималното оптоварување да го оптовариме кабелот од претходниот Пример 5.10 ако сакаме да постигнеме неговата целосна топлинска искористеност, т.е. неговата еквивалентна топлинска истрошеност во текот на еден ден да биде $\lambda_{ek} = 1$.

Решение

Од претходниот пример може да се види дека стареењето на овој кабел главно се одвива во периодот на големите оптоварувања. Во конкретниот случај тоа е периодот од 8 до 18 часот којшто трае 10 часови и на тој период отпаѓа околу 97% од дневната истрошеност на кабелот, додека во преостанатите 14 часа од денот стареењето на кабелот изнесува само 3% од вкупното дневно стареење. Тоа ни овозможува задачата да ја решиме упростено на тој начин што ќе сметаме дека практично целото дневно стареење на кабелот се остварува во периодот на големите оптоварувања, т.е.:

$$\lambda_{ek} = \frac{\lambda_1 \cdot \Delta t_1 + \lambda_2 \cdot \Delta t_2 + \lambda_3 \cdot \Delta t_3}{\Delta t_1 + \Delta t_2 + \Delta t_3} \approx \frac{\lambda_2 \cdot \Delta t_2}{\Delta t_1 + \Delta t_2 + \Delta t_3} = \frac{\lambda_2 \cdot 10}{24}.$$

Понатаму, тргнувајќи од условот $\lambda_{ek} = 1$, се добива:

$$\lambda_2 = 2,4 \cdot \lambda_{ek} = 2,4.$$

Од друга страна имаме:

$$\lambda_2 = 2^{\frac{\theta_2 - \theta_{\max.T}}{6}} \equiv 2,4; \Rightarrow \frac{\theta_2 - \theta_{\max.T}}{6} \cdot \ln 2 = \ln 2,4,$$

од каде што најнапред се пресметува температурата θ_2 што ќе се има во текот на вториот интервал, т.е. во режимот на максималното оптоварување:

$$\theta_2 = \theta_{d.T} + 6 \cdot \frac{\ln 2,4}{\ln 2} = 70 + 6 \cdot \frac{\ln 2,4}{\ln 2} = 77,6^\circ\text{C}.$$

а потоа се пресметува и бараната струја I_{\max} што ќе ја развие оваа температура на кабелот:

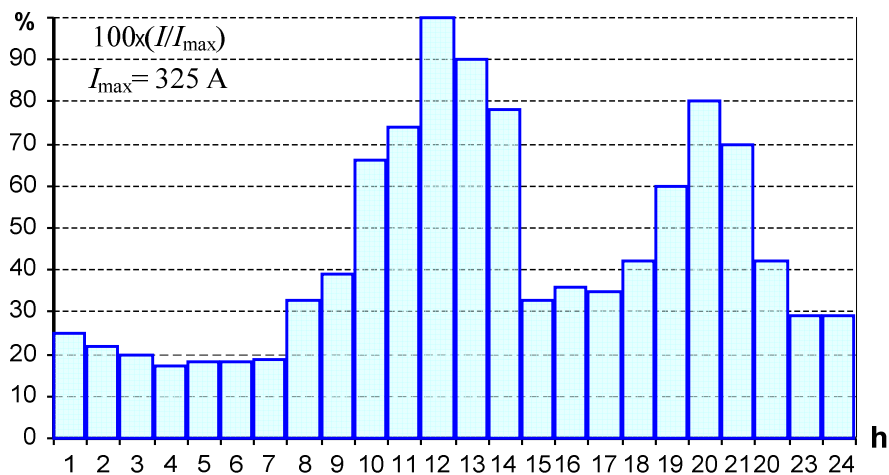
$$\theta_2 = \theta_a + (\theta_{d.T} - \theta_{a.T}) \cdot \left(\frac{I_{\max}}{I_{d.T}} \right)^2 \Rightarrow \left(\frac{I_{\max}}{I_{d.T}} \right)^2 = \frac{\theta_2 - \theta_a}{\theta_{d.T} - \theta_{a.T}} = \frac{77,6 - 10}{70 - 20} = 1,352;$$

$$I_{\max} = I_{d.T} \cdot \sqrt{1,352} = 215 \cdot 1,163 = 250 \text{ A}.$$

Лесно може да се провери дека за оваа струја стареењето ќе биде $\lambda_{ek} = 1,003 \approx 1$.

■ ■ ■

Пример бр. 5.12. 10 kV кабелски извод од една градска дистрибутивна мрежа напојува станбена населба преку поголем број редно поврзани трансформаторски станици ТС 10/0,4 kV/kV. Кабелот е од типот IPO 13 3×150, 6/10 kV, како и кабелот од примерот 5.5. Струјата во почетната делница се менува во текот на денот според дневниот дијаграм на оптоварување (слика П.5.12.1). Во табелата Т.5.12.1 е прикажана промената на струјата и моќноста во почетната делница од кабелот во текот на денот. Познати се амбиентната и почетната температура: $\theta_a = 20^\circ\text{C}$; $\theta(0) = \theta_0 = 24^\circ\text{C}$.



Слика П.5.12.1 Промена на струјата во главната делница во текот на денот

Со помош на општиот израз (5.13) да се определи временскиот тек на зависноста на температурата на кабелот $\theta(t)$ а потоа да се определи релативното стареење на кабелот λ што ќе се оствари во текот на еден ден.

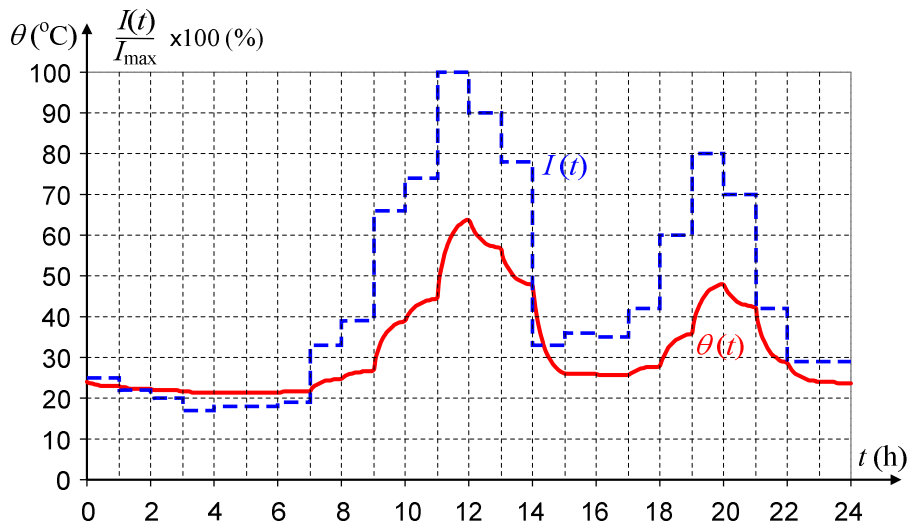
Табела Т.5.12.1 Вредности на струите и моќностите во кабелот текот на денот

Период	P	Q	S	I	$100 \times I/I_{\max}$
(h)	(MW)	(Mvar)	(MVA)	(A)	%
1	1,337	0,439	1,407	81	25
2	1,176	0,387	1,238	72	22
3	1,070	0,352	1,126	65	20
4	0,909	0,299	0,957	55	17
5	0,963	0,316	1,013	59	18
6	0,963	0,316	1,013	59	18
7	1,016	0,334	1,070	62	19
8	1,765	0,580	1,858	107	33
9	2,086	0,685	2,195	127	39
10	3,529	1,160	3,715	215	66
11	3,957	1,301	4,165	241	74
12	5,348	1,758	5,629	325	100
13	4,813	1,582	5,066	293	90
14	4,171	1,371	4,391	254	78
15	1,765	0,580	1,858	107	33
16	1,925	0,633	2,026	117	36
17	1,872	0,615	1,970	114	35
18	2,246	0,738	2,364	137	42
19	3,209	1,055	3,377	195	60
20	4,278	1,406	4,503	260	80
21	3,743	1,230	3,940	228	70
22	2,246	0,738	2,364	137	42
23	1,551	0,510	1,632	94	29
24	1,551	0,510	1,632	94	29

Решение:

Во овој случај денот ќе го поделиме на 24 временски интервали, секој со траење од по 1 час. Во секој од тие интервали струјното оптоварување на кабелот $I(t)$ е константно и познато. Тргувајќи од познатата температура θ_0 на почетокот од секој таков интервал (која што е всушност еднаква на температурата на кабелот на крајот од претходниот интервал), најнапред се пресметува стационарната надтемпература $\Delta\theta_{\infty}$, а потоа, со помош на изразот (5.13), и временскиот тек $\theta(t)$ за тој интервал. На тој начин, повторувајќи ја оваа процедура 24 пати, по еднаш за секој час од денот, се добива зависноста $\theta(t)$ на температурата на кабелот во текот на целиот ден. Таа е графички прикажана на сликата П.5.12.2.

Од дијаграмот се забележува дека најголемата температура што ја достигнал кабелот се остварува во текот на 12-тиот час и изнесува $\theta_{\max} = 64^{\circ}\text{C}$, додека најмалата температура изнесува $\theta_{\min} = 21,3^{\circ}\text{C}$ и таа се постигнува во режимите со минимално оптоварување. Пресметките покажуваат дека средната (просечната) температура на кабелот во текот на денот изнесува $\theta_{\text{средно}} = 32,8^{\circ}\text{C}$. Тоа значи дека, иако кабелот повремено ја достигнува трајно дозволената температура, сепак преку денот работи со многу мала просечна температура, што значи дека тој не е доволно искористен.



Слика П.5.11.2 Временска промена $\theta(t)$ во ($^{\circ}\text{C}$) и дневен дијаграм на струјата во кабелот во (%) од максималната струја I_{max}

Старењето на изолацијата на кабелот поради променливиот карактер на зависноста $\theta(t)$ ќе се одвива со различна брзина. Релативното стареење на кабелот λ во текот на еден кус временски интервал Δt се пресметува со помош на тнар. „шестепено правило“, и изнесува:

$$\lambda = 2^{\frac{\theta - \theta_{\text{max.T}}}{6}}$$

Во оваа формула со θ е означена работната температура на кабелот во текот на набљудуваниот временски интервал Δt додека со $\theta_{\text{max.T}}$ е означена најголемата трајно дозволена температура на изолацијата од кабелот (според табелата 5.1). Под релативно стареење на кабелот се подразбира односот помеѓу животниот век на кабелот којшто работи со даденото променливо оптоварување односно променлива температура $\theta(t)$ и животниот век на истиот тој кабел кога тој би работел со константно оптоварување и константна температура, еднаква на најголемата трајно-дозволена $\theta_{\text{max.T}}$.

Постапувајќи на опишаниот начин, ако денот го поделиме на доволен број мали интервали Δt_i и ако за секој таков интервал ја определиме вредноста на релативното стареење на кабелот λ_i , со помош на изразот:

$$\lambda = \frac{\lambda_1 \cdot \Delta t_1 + \lambda_2 \cdot \Delta t_2 + \dots + \lambda_n \cdot \Delta t_n}{\Delta t_1 + \Delta t_2 + \Delta t_3 + \dots + \Delta t_n}$$

ќе ја добиеме вредноста на релативното стареење на кабелот λ што ќе се оствари во текот на еден ден.

Во конкретниот случај, работејќи со $\Delta t = 5 \text{ min}$, за релативното стареење на посматраниот кабел во текот на еден ден, се добива вредноста $\lambda = 0,073$. Ова значи дека кабелот, иако во еден момент практично ја достигнал својата максимална трајно-дозволена температура $\theta_{\text{max.T}} = 65^{\circ}\text{C}$, сепак преку денот работи со многу помала просечна температура поради што е сосема малку термички искористен и рационално е тој да се дооптовари, зашто физичкиот век на еден кабел зависи од брзината на стареење на сите компоненти во неговата конструкција а не само од брзината на стареењето на неговата изолација.

Така, на пример, ако вредностите на струите од табелата Т.5.12.1 ги зголемиме за 10% ($I_{\max} = 1,1 \cdot 325 = 357,5$ А), тогаш температурата на кабелот во режимот на максимално оптоварување ќе достигне $73,2^{\circ}\text{C}$, а сепак, и покрај тоа, неговата просечна температура ќе биде $\theta_{\text{средно}} = 34,3^{\circ}\text{C}$ додека релативното стареење на кабелот во текот на денот ќе изнесува $\lambda = 0,167$.

Пресметките покажуваат дека најголемото струјно оптоварување на кабелот во максималниот режим I_{\max} за коешто ќе се постигне релативното стареење на кабелот да изнесува точно $\lambda = 1$ ќе изнесува $I_{\max} = 415$ А, а тоа е за 27,7% повеќе од неговата трајно дозволена струја $I_{d.T} = 325$ А. Тоа би значело дека дозволеениот фактор на преоптоварување на кабелот во овој случај би изнесувал $c_r = 1,277$ без да се плашине дека изолацијата на кабелот предвреме ќе остари и дека тоа ќе се одрази врз неговиот животен век.

Се разбира дека вака определениот дозволен степен на дооптоварување на кабелот c_r , со којшто се постигнува условот $\lambda = 1$, зависи уште и од обликот на дневниот дијаграм на оптоварување. Кај порамномерните дневни дијаграми на оптоварување, со поголем „фактор на пополнетост“ (како што се на пример дијаграмите на индустриските потрошувачи) факторот c_r ќе биде помал – и обратно.

Забелешка: Во зимски услови, кога амбиентната температура е пониска, брзината на стареењето на изолацијата е помала. Така, на пример, кога е таа $\theta_a = 10^{\circ}\text{C}$ (што е кај нас типично за температурата на земјиштето на длабочини $0,7 \div 1$ m во зимските месеци) релативното стареење на кабелот во текот на денот ќе изнесува $\lambda = 0,023$ ($\theta_{\max} = 54^{\circ}\text{C}$) додека дозволеениот фактор на преоптоварување на кабелот со којшто се постигнува $\lambda = 1$ во овој случај би изнесувал $c_r = 1,374$.



Пример 5.13. Кабел од од истиот тип како оној во Примерот 5.1 (IPO 13 3x95 6/10 kV; $I_{d.T} = 255$ А; $\theta_{d.T} = 65^{\circ}\text{C}$) е положен во земја, во номинални услови (осамен, $\theta_a = 20^{\circ}\text{C}$; $\rho = 1^{\circ}\text{K} \cdot \text{m/W}$). Тој напојува индустриски потрошувач којшто работи во интермитентен цикличен режим, така што во периодот на работење, кој што трае $t_r = 15$ min, презема моќност $P_p = 4,16$ MW; $\cos \varphi_p = 0,8$, после кое следува пауза во времетраење $t_p = 30$ min.

Да се пресмета интервалот (θ_{\min} , θ_{\max}) во кој што ќе варира температурата на кабелот во текот на неговата работа.

Р е ш е н и е:

Струјното оптоварување на кабелот во периодот на работа t_r ќе биде:

$$I_p = \frac{P_p}{\sqrt{3} \cdot U_n \cdot \cos \varphi_p} = \frac{4,16 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 10 \cdot 0,8} = 0,3 \text{ kA} = 300 \text{ A}.$$

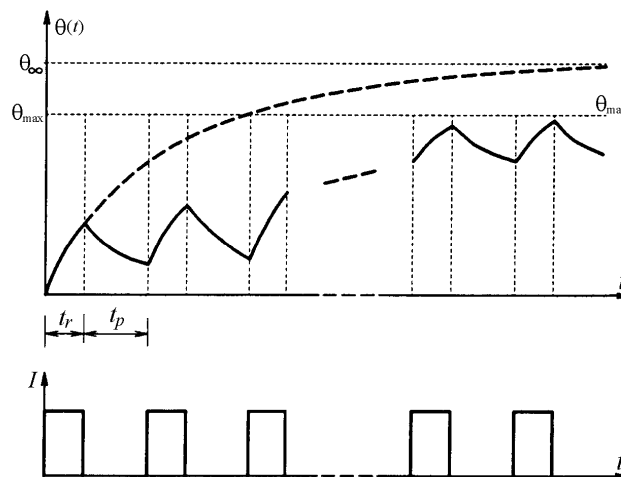
Бидејќи е $I = I_p > I_{d.T}$, на прв поглед се чини дека кабелот ќе биде преоптоварен. Но пресметките ќе покажат дека иако кабелот е во извесен период од работниот циклус „струјно преоптоварен“ тој сепак нема воопшто да ја достигне својата максимална дозвоена температура $\theta_{d.T} = 65^{\circ}\text{C}$, што значи дека тој нема термички да биде термички преоптоварен, па дури тој би можел да биде струјно дооптоварен.

Ако со θ_∞ ја означиме стационарната температура, а со $\Delta\theta_\infty$ ја означиме трајната надтемпература на кабелот што ќе би се постигнала во стационарен режим при струјно оптоварување на кабелот $I = I_p = 300$ А, тогаш ќе имаме:

$$\Delta\theta_\infty = (\theta_{d.T} - \theta_{a.T}) \cdot \left(\frac{I}{I_{d.T}} \right)^2 = (65 - 20) \cdot \left(\frac{300}{255} \right)^2 = 62,3^\circ\text{C};$$

$$\theta_\infty = \theta_a + \Delta\theta_\infty = 20 + 62,3 = 82,3^\circ\text{C}.$$

Но бидејќи кабелот ќе работи во интермитентен режим, тој нема да ја достигне таа температура, туку негоја друга, помала од неа, (слика 18.1) којашто ќе ја означиме со θ_{\max} .



Слика П.5.13. Временски тек на температурата на кабелот кај интермитентен цикличен режим

Во периодот на паузата температурата на кабелот перманентно ќе опаѓа од својата максимална температура θ_{\max} до својата минимална температура. Оваа температура на кабелот којашто ќе се достигне на крајот од периодот со пауза ќе биде најмала и ќе ја означиме со θ_{\min} .

Ако со $\Delta\theta_{\max} = \theta_{\max} - \theta_a$ и $\Delta\theta_{\min} = \theta_{\min} - \theta_a$ ги означиме соодветните надтемператури на кабелот, тогаш, врз основ а на изразот (5.13) од Учебникот, ќе можеме да пишуваме:

1) за периодот на работа (период на загревање на кабелот):

$$\Delta\theta_{\max} = \Delta\theta_\infty \cdot \left(1 - e^{-t_r/\tau} \right) + \Delta\theta_{\min} \cdot e^{-t_r/\tau} \quad \text{и} \quad (1)$$

2) за периодот на пауза (период на ладење на кабелот):

$$\Delta\theta_{\min} = \Delta\theta_{\max} \cdot e^{-t_p/\tau}. \quad (2)$$

Релациите (1) и (2) формираат систем од две равенки со две непознати, θ_{\min} и θ_{\max} .

Со елиминација на непознатата $\Delta\theta_{\min}$, т.е. со нејзино изразување преку променливата θ_{\max} од (2) во (1), се добива:

$$\Delta\theta_{\max} = \Delta\theta_{\infty} \cdot \frac{1 - e^{-t_r/\tau}}{1 - e^{-(t_r+t_p)/\tau}} \quad (3)$$

Со внесување во (3) на бројните вредности за одделните величини се добива:

$$t_r = 15 \text{ min}; \quad t_p = 30 \text{ min}; \quad \tau = 20 \text{ min}; \quad \theta_a = 20^\circ\text{C};$$

$$\Delta\theta_{\max} = 62,3 \cdot \frac{1 - e^{-15/20}}{1 - e^{-45/20}} = 62,3 \cdot 0,59 = 36,8^\circ\text{C};$$

$$\theta_{\max} = \theta_a + \Delta\theta_{\max} = 56,8^\circ\text{C}.$$

$$\Delta\theta_{\min} = \Delta\theta_{\max} \cdot e^{-t_p/\tau} = 36,8 \cdot e^{-30/20} = 8,2^\circ\text{C};$$

$$\theta_{\min} = \theta_a + \Delta\theta_{\min} = 28,2^\circ\text{C}.$$

Значи температурата на кабелот ќе варира во границите: $28,2^\circ\text{C} \leq \theta \leq 56,8^\circ\text{C}$.

Може да се заклучи дека иако оптоварувањето на кабелот I_p е поголемо од неговото трајно дозволено струјно оптоварување $I_{d.T}$ ($300 \text{ A} > 255 \text{ A}$), поради интермитентниот карактер на погонот нема да дојде до прекумерно загревање на кабелот ниту, пак, до негово забрзано стареење.



Пример 5.14. Колкава треба да биде струјата на оптоварување $I = I_p = ?$ на кабелот од Примерот 5.13 за време на работниот дел од циклусот за максималната температура на кабелот да биде еднаква на дозволената: $\theta_{\max} = \theta_{d.T} = 65^\circ\text{C} ?$

Решение

Од претходниот пример 5.13 се заклучува дека во интермитентните режими на работа е можно кабелот да остане термички недоискористен дури и тогаш кога неговото струјно оптоварување за време на погонот е поголемо од трајно дозволеното струјно оптоварување ($I_p > I_{d.T}$) зашто поради интермитентниот карактер на погонот не се достигнува трајната дозволена температура на кабелот $\theta_{d.T}$. За да се постигне целосно термичко искористување на каблите пожелно е максималната температура на кабелот θ_{\max} да биде еднаква на својата трајно дозволена температура $\theta_{d.T}$, т.е. да биде исполнет условот:

$$\Delta\theta_{\max} = \Delta\theta_{d.T}.$$

Според релацијата (5.26) од Учебникот горниот услов ќе биде исполнет ако односот $c_r = I / I_{d.T}$, кој што се нарекува *коэффициент на преоптоварување во интермитентен режим*, е еднаков на:

$$c_r = \frac{I}{I_{d.T}} = \frac{\Delta\theta_{\infty}}{\Delta\theta_{d.T}} = \sqrt{\frac{1 - e^{-(t_r+t_p)/\tau}}{1 - e^{-t_r/\tau}}} = \sqrt{\frac{1 - e^{-t_c/\tau}}{1 - e^{-\varepsilon \cdot t_c/\tau}}} \quad (1)$$

Во последната релација со t_c е означена должината на циклусот на интермитентниот режим на работа, т.е. $t_c = t_r + t_p$, додека со ε е означен односот на времињата t_r и t_c , т.е.:

$$\varepsilon = \frac{t_r}{t_C} = \frac{t_r}{t_r + t_p}, \quad (2)$$

којшто се нарекува релативно траење на оптоварувањето.

Во случаите кога се работи за мали времиња на работа t_r во споредба со должината на циклусот t_C , релативното траење на оптоварувањето $\varepsilon \rightarrow 0$, па во тој случај коефициентот на преоптоварување c_r може, приближно, да се пресмета со помош на изразот:

$$c_r \approx \sqrt{\frac{t_C}{t_r}} \approx \sqrt{\frac{1}{\varepsilon}}.$$

Во конкретниот случај ќе имаме:

$$I_{d.T} = 255 \text{ A}; \quad \tau = 20 \text{ min}; \quad t_r = 15 \text{ min}; \quad t_p = 30 \text{ min}; \quad t_C = 45 \text{ min}; \quad \varepsilon = 15/45 = 0,333;$$

$$c_r = \sqrt{\frac{1 - e^{-t_C/\tau}}{1 - e^{-\varepsilon t_C/\tau}}} = \sqrt{\frac{1 - e^{-45/20}}{1 - e^{-15/20}}} = 1,302; \quad \Rightarrow \quad I_{\max} = c_r \cdot I_{d.T} = 1,302 \cdot 255 = 332 \text{ A}.$$

Значи дури при струја на оптоварување од 332 А, којашто е за 30% поголема од трајно дозволената струја на кабелот, ќе се постигне неговото целосно термичко искористување.



5.7 ДОЗВОЛЕНИ СТРУИ НА КУСИ ВРСКИ

Струите што течат низ каблите во режимот на куса врска можат да бидат и по неколку десетини пати поголеми од нивните трајно дозволени струи. Големата струја на кусата врска и за сосема кратко време ќе предизвика нагло повишување на температурата на спроводниците што може да предизвика хемиско разградување на изолацијата и нејзино оштетување или влошување (па дури и губење) на нејзините изолациони и механички особини. Тоа понатаму може да доведе до појава на дефекти на кабелот, т.е. до пробој на изолацијата, прекин во електроснабдувањето и други директни или индиректни штети и во мрежата но и кај самите потрошувачи.

Температурата што кратковремено може да се дозволи на спроводниците, без тоа да има приметни штетни последици по самата изолација, обично ја определуваат самите производители на каблите, или пак таа е ограничена со определени стандарди и прописи. Со оглед на краткотрајноста на режимот на кусата врска, максималната температура што се дозволува во режимот на кусата врска е секогаш значително поголема од трајно дозволената температура на кабелот што се допушта во нормалниот погон. Според производителите, (на пример ELKA–Загреб и ФК–Јагодина), дозволените температури на спроводниците во режимот на куса врска се дадени во табелите 5.1 и 5.18. Овие температури не смеат да бидат надминати во режимот на кусата врска, т.е. струјата на кусата врска низ кабелот мора да се прекине пред температурата на спроводниците да ја достигне својата максимална дозволена вредност.

Од досега кажаното произлегува дека дозволената струја на кусата врска во кабелот ќе зависи од повеќе фактори и тоа:

- од максималната дозволена температура што спроводниците можат да ја достигнат во режимот на кусата врска;
- од температурата на спроводниците пред настанувањето на кусата врска;
- од времетраењето на струјата на кусата врска;
- од материјалот и пресекот A со којшто се изработени спроводниците.

5.7.1 Дозволени струи на куса врска кога струјата има константен интензитет

За загревањето на кабелот во режимот на кусата врска ќе биде меродавна големината на таканаречениот топлински импулс што се ослободува за време на траењето на кусата врска T :

$$A_k = \int_0^T i_k^2(t) \cdot dt \quad . \quad (5.31)$$

Кога струјата на кусата врска се менува по прстопериодичен закон и има константна ефективна вредност, тогаш за пресметување на топлинскиот импулс A_k ќе биде доволно да се знаат ефективната вредност на струјата на кусата врска I_k и нејзиното времетраење T , т.е. тогаш ќе биде:

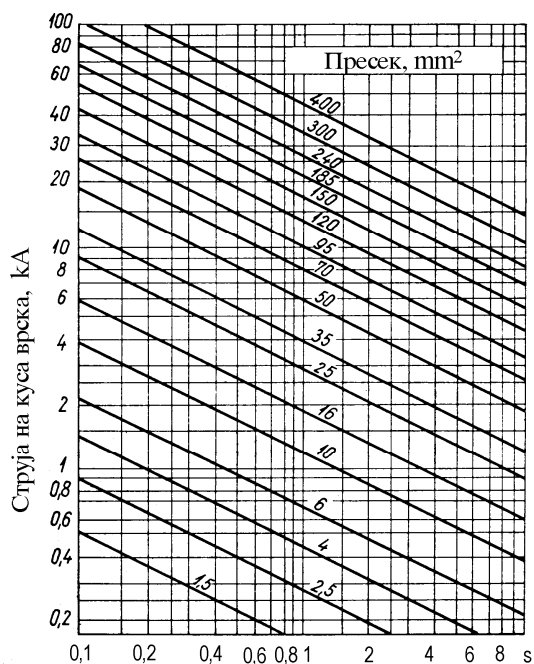
$$A_k = \int_0^T i_k^2(t) \cdot dt = I_k^2 \cdot T \quad . \quad (5.32)$$

Скоро сите производители на кабли за своите производи даваат номограми од кои на сосема едноставен начин може да се отчита, зависно од големината на струјата I_k , дозволеното времетраење на струјата на куса врска низ кабелот. Некои такви номограми се прикажани на сликите 5.7 и 5.8.

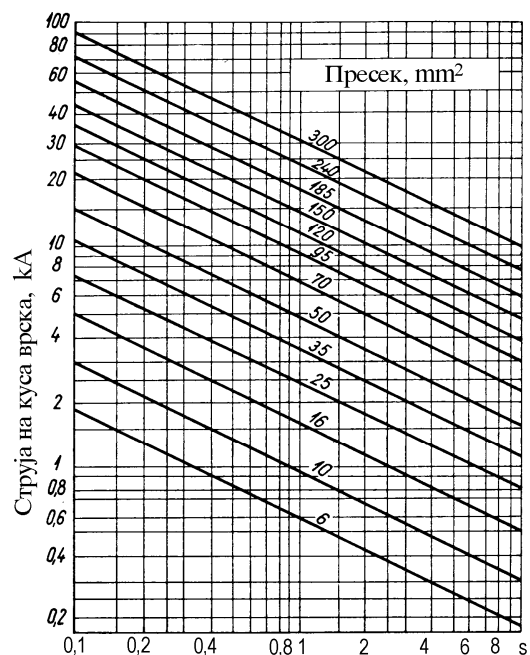
За определување на дозволеният топлински импулс што може да го прими кабелот во режимот на кусата врска, често пати се користи и поимот „кратковремена дозволена густина на струјата“ j_k . Густината j_k обично се изразува во (A/mm^2) и претставува таква густина на струјата што кабелот ќе ја издржи во текот на една секунда без да дојде до негово прегревање и оштетување. За илустрација ќе ни послужат податоците за кратковремената дозволена густина j_k за разни врсти кабли и за разни времиња на траење на кусата врска, според производителот ELKA - Zagreb, прикажани во табелата 5.19.

Дијаграмите од сликите 5.7 и 5.8 како и податоците од табелата 5.19 се однесуваат на најнеповолниот случај, кога почетната температура на кабелот е еднаква на максималната дозволена температура на кабелот во траен погон, определена според табелата 5.1.

Доколку пред настанувањето на кусата врска кабелот не бил номинално оптоварен, тогаш може да се дозволи и поголема струја I_k односно нејзино подолго времетраење во однос на соодветните вредности, определени според сликите 5.7 и 5.8, односно табелата 5.19. Во таа смисла, за овие корекции може да се користат дијаграмите, прикажани на сликите 5.9.



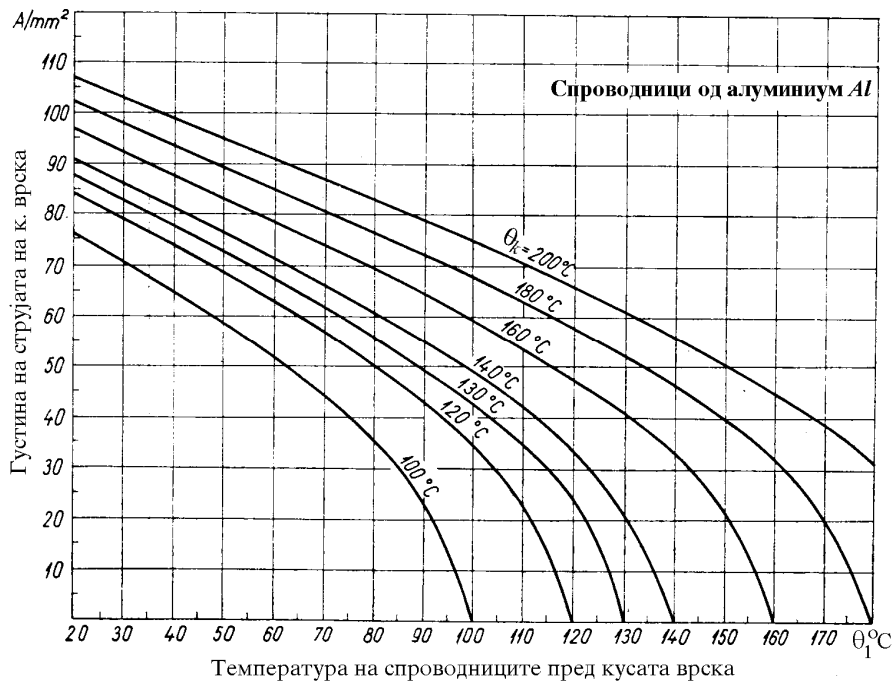
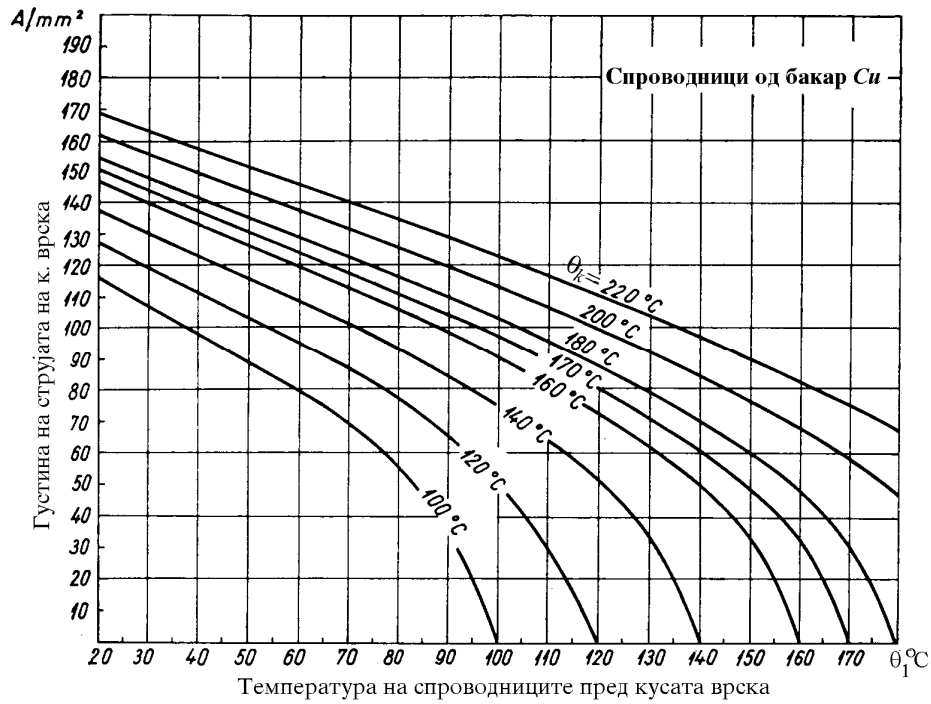
Слика 5.7 Дозволени времетраења на струјата на кусата врска за кабли 1-3 kV, производ на фабрика за кабли – Јагодина



Слика 5.8 Дозволени времетраења на струјата на кусата врска за кабли 6-10 kV, производ на фабрика за кабли – Јагодина

Табела 5.19 Дозволени температури и дозволени кратковремени густини на струјата на куса врска за разни типови кабли, производ на ELKA - Загреб

Тип на изолацијата	Почетна температура на изол. θ_p	Дозволена температура на изол. θ_k	Дозволена густина на струјата j_k (A/mm ²) за рази времетраења на кусата врска					
			0,1	0,2	0,5	1,0	2,0	5,0
<i>Спроводници од бакар Si</i>								
PVC	70	160	364	257	163	115	81	52
PE	70	150	345	244	154	110	77	49
XPE	90	250	454	321	203	144	101	64
EPDM	90	250	454	321	203	144	101	64
IP, 6 kV–појасни	80	180	376	266	168	119	84	53
IP, 10 kV–појасни	65	165	385	272	172	122	86	54
IP–триоловни, 20 kV	65	155	367	260	164	116	82	52
IP, H–кабли 35 kV	60	140	351	248	157	111	79	50
<i>Спроводници од алуминиум Al</i>								
PVC	70	160	236	167	105	74,5	52,7	33,3
PE	70	150	224	158	100	70,7	50	31,6
XPE	90	250	293	207	131	92,5	65,4	41,4
EPDM	90	250	293	207	131	92,5	65,4	41,4
IP, 6 kV–појасни	80	180	243	172	109	76,8	54,3	34,3
IP, 10 kV–појасни	65	165	248	176	111	78,5	55,5	35
IP, –триоловни, 20 kV	65	155	237	168	106	75	53	33,5
IP, H–кабли 35 kV	60	140	227	160	101	71,7	50,7	32



Слика 5.9 Дозволени едносекундни густини на струјата на к. врска во зависност од температурата на кабелот θ_1 пред настанувањето на к. врска и во зависност од максималаната дозволена температура θ_k во режимот на куса врска

□ □ □

Пример бр. 5.15. Кабелот од примерот 5.5 (IPO 13 3×150 6/10 kV) се напојува од трансформаторска станица TC 110/10 kV/kV со номинална моќност $S_n = 40$ MVA. Струјата на трифазна куса врска, настаната на почетокот од кабелот изнесува $I_k = 15$ kA. Настана-

тата куса врска се исклучува за време од $T_{\text{iskl}} = 1$ s. Да се утврди дали кабелот задоволува од аспект на термичките напрегања за време на кусата врска. Колкаво е најголемото време на дејствување на заштитата од куси врски $T_{\text{iskl.max}}$ за коешто кабелот ќе ги издржи термичките напрегања за време на кусата врска.

Решение

Од табелата 5.19 ја отчитуваме едносекундната дозволена густина на струјата на куса врска за овој кабел чиито спроводници се од бакар: $j_{1s} = 122$ A/mm². Со оглед на тоа што кабелот има пресек $A = 150$ mm², произлегува дека едносекундната дозволена струја на кусата врска ќе изнесува:

$$I_{k.1s} = j_{1s} \cdot A = 122 \cdot 150 = 18,300 \text{ A} = 18,3 \text{ kA}.$$

Значи кабелот ќе ги издржи термичките напрегања и за време на кусата врска нема да биде пречекорена дозволена температура од 165°C зашто е $I_{k.1s} > I_k$.

Бараното максимално време на дејствување на релејната заштита од кусите врски $T_{\text{iskl.max}}$ кусата врска да биде еднаков на едносекундниот дозволен топлински услов, т.е.

$$I_{k.1s}^2 \cdot 1 = I_k^2 \cdot T_{\text{iskl.max}} \Rightarrow T_{\text{iskl.max}} = (I_{k.1s} / I_k)^2 = (18,3 / 15)^2 = 1,49 \text{ s}.$$



Пример 5.16. Се посматра кабелот од Примерот 5.1 (ПО 13 3x150 6/10 kV; $I_{d.T} = 325$ A; $\theta_{d.T} = 65^\circ\text{C}$), поставен во номинални услови. Кабелот е номинално оптоварен така што температурата на неговите спроводници е еднаква на максимално дозволена 65°C. Да се утврди:

а) дали кабелот ќе биде термички преоптоварен во режимот на куса врска ако струјата на куса врска што тече низ него изнесува $I_k = 10$ kA, а притоа времето на исклучување на кусата врска изнесува $T_{\text{iskl}} = 0,5$ s.

б) колкаво е граничното време на исклучување на кусата врска $T_{\text{iskl.gr}} = ?$ за овој кабел, т.е. она времетраење на кусата врска за кое температурата на кабелот ќе ја достигне максимално дозволена $\theta_{dk.max} = 165^\circ\text{C}$ (табела 5.1 од Учебникот).

в) колкаво ќе биде граничното време на исклучување на кусата врска $t'_{\text{iskl.ep}}$ за овој кабел, т.е. ако пред настанувањето на кусата врска кабелот бил неоптоварен и неговата температура изнесувала $\theta_0 = \theta_a = 20^\circ\text{C}$. (При решавањето на овој дел од задачата да се користат дијаграмите од сл. 5.8, прикажани на страна 47).

Решение

а) За номинално оптоварен кабел, за кој температурата на спроводниците пред настанувањето на кусата врска е еднаква на максимално дозволена $\theta_{d.T}$ (во овој случај $\theta_{d.T} = 65^\circ\text{C}$), дозволена едносекундна густина на струјата на куса врска ја отчитуваме од табелата 5.19 на страна 45: $j_{1s} = 122$ A/mm². На тој начин, всушност, ја добиваме и вредноста дозволена едносекундна струја на кусата врска I_{1s} :

$$I_{1s} = j_{1s} \cdot A = 122 \cdot 150 = 18300 \text{ A} = 18,3 \text{ kA}.$$

Во општ случај, кога кусата врска трае T_{iskl} секунди, дозволената густина на струјата на куса врска j_k ќе биде за $\sqrt{T_{\text{iskl}}}$ пати помала во однос на нејзината едносекундна вредност j_{1s} , затоа што во тој случај топлинскиот импулс $A = \int i^2 dt$ ќе остане ист на оној што одговара на дозволената едносекундна струја на кусата врска I_{1s} .

Во конкретниот случај кога времето на исклучување на кусата врска изнесува $T_{\text{iskl}} = 0,5$ s, дозволената густина на струјата на куса врска $j_{0,5s}$ ќе биде:

$$j_{0,5s} = j_{1s} / \sqrt{0,5} = 122 / \sqrt{0,5} = 172 \text{ A/mm}^2,$$

колку што, впрочем, може и да се отчита од истата табела 5.19. Според тоа, вредноста $I_{k.\text{doz}}$ на струјата на куса врска која за време на кусата врска ќе ја подигне температурата на спроводниците од кабелот на максимално дозволената вредност од $\theta_{d.\text{max}} = 165^\circ\text{C}$ (табела (5.1) ќе изнесува:

$$I_{k.\text{doz}} = I_{0,5s} = j_{0,5s} \cdot A = 172 \cdot 150 = 25800 \text{ A} = 25,8 \text{ kA}.$$

Бидејќи струјата на куса врска што ќе тече низ кабелот во конкретниот случај изнесува $I_k = 10 \text{ kA} < 25,8 \text{ kA}$, (значи $I_k < I_{k.\text{doz}}$) кабелот нема термички да се преоптовари за време на кусата врска. Заклучуваме дека, во случајов, времетраењето на кусата врска може да биде и подолго од 0,5 s.

б) Граничното време на исклучување на кусата врска $T_{\text{iskl.гр}}$ ќе го добиеме повторно од условот топлинскиот импулс $A_k = I_k^2 \cdot T_{\text{iskl.гр}}$ што ќе се оствари во тој случај да биде еднаков на оној што се остварува за време од 1 s, под дејство на едносекундта струја I_{1s} , т.е.:

$$I_k^2 \cdot T_{\text{iskl.гр}} = I_{1s}^2 \cdot 1. \Rightarrow T_{\text{iskl.гр}} = (I_{1s} / I_k)^2 = (18,3 / 10)^2 = 3,35 \text{ s}.$$

в) Доколку кабелот не бил струјно оптоварен пред настанувањето на кусата врска така што неговата температура била еднаква на амбиентната $\theta_0 = \theta_a = 20^\circ\text{C}$, дозволената едносекундна густина на струјата ќе биде поголема. Нејзината вредност можеме да ја процениме со помош на дијаграмот прикажан на сликата 5.9. Од овој дијаграм (за спроводници од бакар), го отчитуваме следното:

- за случајот кога е $\theta_{dk.\text{max}} = 160^\circ\text{C}$, дозволена едносекундна густина е $j_{1s} = 148 \text{ A/mm}^2$;
- за случајот кога е $\theta_{dk.\text{max}} = 170^\circ\text{C}$, дозволена едносекундна густина е $j_{1s} = 156 \text{ A/mm}^2$.

Значи, на вредноста $\theta_{dk.\text{max}} = 165^\circ\text{C}$ би и одговарала едносекундна густина на струјата којашто претставува средна вредност од претходните две, т.е.:

$$j'_{1s} = 152 \text{ A/mm}^2.$$

Во тој случај едносекундната струја I'_{1s} ќе биде:

$$I'_{1s} = j'_{1s} \cdot A = 152 \cdot 150 = 22,800 \text{ A} \equiv 22,8 \text{ kA}.$$

на оваа вредност на дозволената едносекундна струја на кусата врска ќе ѝ одговара поголемо гранично време на исклучување на кусата врска:

$$T'_{\text{искл.гп}} = (I'_{1s} / I_k)^2 = (22,8/10)^2 = 5,2 \text{ s.}$$

■ ■ ■

5.7.2 Дозволени струи на куса врска кога струјата има променлива ефективна вредност

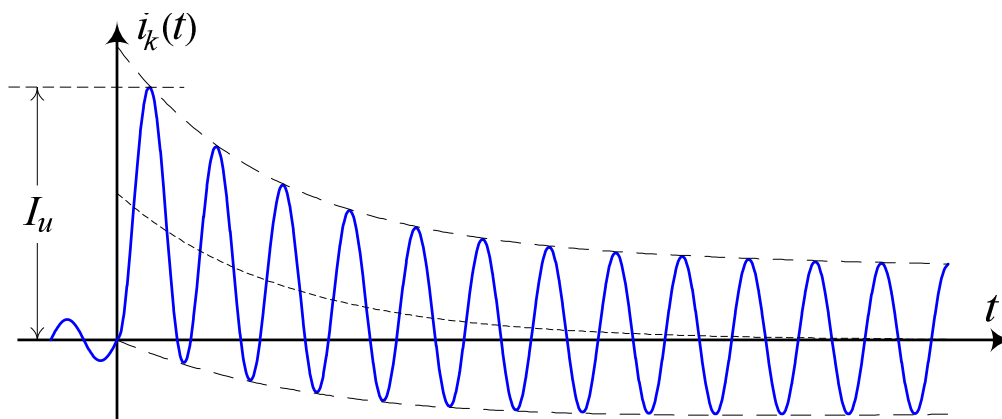
Струјата на куса врска ќе има константна ефективна вредност тогаш кога импеданцијата на делот од мрежата помеѓу изворот/изворите (синхроните генератори) и местото на кусата врска е значително поголема од внатрешната импеданција на самиот извор. Меѓутоа, кога станува збор за куса врска настаната во непосредна близина на синхрон генератор (или општо, синхрона машина), тогаш струјата на кусата врска ќе има сложен облик (слика 5.10), кој упростоено може да се опише со следниот аналитички израз:

$$i_k(t) = \sqrt{2} \cdot I_k(t) \cdot \cos \omega t - i_a(t) , \quad (5.33)$$

или:

$$i_k(t) = \sqrt{2} \cdot [(I_k'' - I_k') \cdot e^{-t/T_d''} + (I_k' - I_k) \cdot e^{-t/T_d'} + I_k] \cdot \cos \omega t - \sqrt{2} \cdot I_k'' \cdot e^{-t/T_a} \quad (5.34)$$

Значи, струјата на куса врска во општ случај се состои од два члена т.е. компоненти: периодична (наизменична) компонента, која се менува со кружна фреквенција ω и која има временски променлива (опаѓачка) ефективна вредност $I_k(t)$ и апериодична (еднонасочна) компонента $i_a(t)$, која се придушува во текот на времето по експоненцијален закон.



Слика 5.10. Облик на струјата на куса врска настаната во непосредна близина на извор (синхрон генератор)

Временските константи T_d'' и T_d' кои фигурираат во (5.34) се таканаречените *суптранзиентна* и *транзиентна* временска константа. Првата има ред на големина од $0,03 \div 0,05$ секунди, додека втората е значително поголема и се движи во границите од $1 \div 1,5$ секунди. Временската константа T_a со која се придушува апериодичната компонента на струјата на кусата врска е од редот на големина $0,05 \div 0,1$ s.

Се покажува дека *топлинскиот импулс* A_k на струјата на кусата врска и во овој случај може да се пресмета, но тоа ќе биде сега многу посложено. За таа цел ,оже да се примени следната формула.

$$\begin{aligned}
 A_k &= \int_0^T i_k^2(t) \cdot dt = \\
 &= (T_d'' / 2) \cdot (I_k'' - I_k')^2 (1 - e^{-2T/T_d''}) + (T_d' / 2) \cdot (I_k' - I_k)^2 \cdot (1 - e^{-2T/T_d'}) + \\
 &+ T_a \cdot (I_k'')^2 \cdot (1 - e^{-2T/T_a}) + T \cdot I_k''^2 + 2T_d'' \cdot I_k'' \cdot (I_k'' - I_k') \cdot (1 - e^{-T/T_d''}) + \\
 &+ 2T_d' \cdot I_k' \cdot (I_k' - I_k) \cdot (1 - e^{-T/T_d'}) + + 2T_d \cdot (I_k'' - I_k') \cdot (I_k' - I_k) \cdot (1 - e^{-T/T_d}).
 \end{aligned} \tag{5.35}$$

Покрај временските константи T_d'' , T_d' и T_a , во изразите (5.31) и (5.32) фигурираат уште и следните величини:

I_k'' – субтранзиентна (почетна) струја на кусата врска;

I_k' – транзиентна (преодна) струја на кусата врска;

I_k – трајна струја на кусата врска;

$$T_d = (T_d'' \cdot T_d') / (T_d'' + T_d')$$

Изразот (5.35) е прилично сложен и сосема неподесен за практична примена. Затоа, наместо овој израз, топлинскиот импулс A_k најчесто се пресметува на многу поедноставен начин, со помош на таканаречениот *термички еквивалент* на струјата на кусата врска $I_{k.екв}$, кој може да се пресмета со помош на изразот (5.36), на многу поедноставен начин:

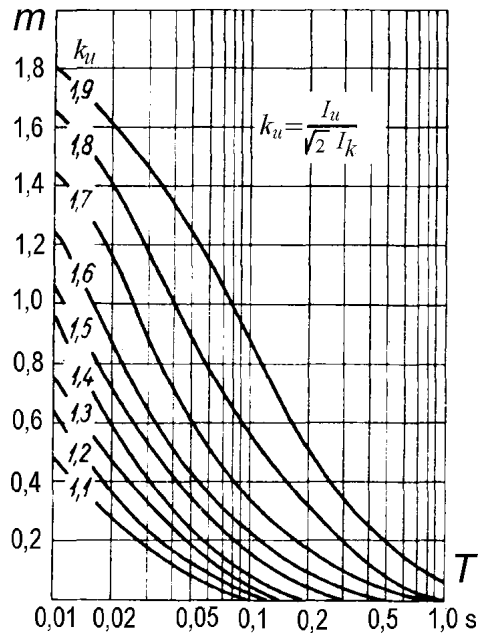
$$I_{k.екв} = I_k'' \cdot \sqrt{m + n}. \tag{5.36}$$

Со параметарот m кој фигурира во изразот (5.36) се опфаќа присуството на апериодичната компонента на струјата на кусата врска $I_a(t)$. Тој зависи од времетраењето на кусата врска T и од т.н. *ударен коефициент* на струјата на куса врска k_u . Ударниот коефициент k_u претставува однос помеѓу максималната моментна вредност на струјата на кусата врска (која уште се нарекува и ударна струја на кусата врска I_u) и темената вредност на нејзината наизменична компонента $\sqrt{2} \cdot I_k''$, т.е:

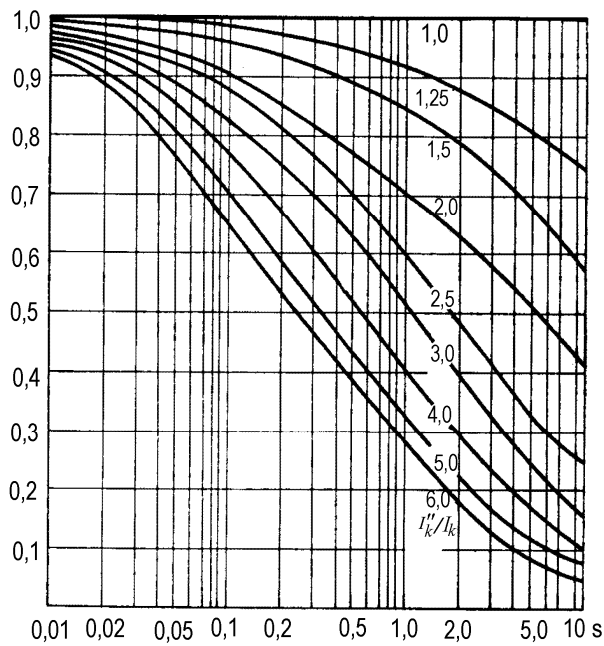
$$k_u = \frac{I_u}{\sqrt{2} \cdot I_k''} = \frac{|i_k(t)_{t=0,01s}|}{\sqrt{2} \cdot I_k''} \tag{5.32}$$

Параметарот m зависи од времетраењето на кусата врска T и од големината на ударниот коефициент k_u и со него се опфаќа влијанието на апериодичната (еднонасочната) компонента на струјата на кусата врска. Таа зависност е прикажана на дијаграмот од слика (5.11).

Со параметарот n во (5.36) се опфаќа влијанието на периодичната (наизменичната) компонента на струјата на кусата врска. Тој зависи од односот I_k'' / I_k на суптранзиентната и трајната струја на кусата врска и неговата вредност може да се отчита од дијаграмот прикажан на сликата (5.12).



Слика 5.11. Зависност на параметрот m од големината на ударниот коефициент k_u и од времетраењето на кусата врска T .



Слика 5.12. Зависност на параметрот n од односот I_k'' / I_k и од времетраењето T на струјата на кусата врска.

НАДЗЕМНИ И КАБЕЛСКИ ВОДОВИ. НАЧИН НА ПОЛАГАЊЕ

(Фонд на часови: 3+2+0+0)

Предавања: Ристо Ачковски, кабинет 216

Вежби: Јорданчо Ангелов, кабинет во Лабораторија за Висок напон.

А) ПРЕПОРАЧАНА ЛИТЕРАТУРА

- [1] Р. Ачковски: “Надземни и кабелски водови” – ЕТФ – Скопје, Скопје, 1995– учебник. Книга, во pdf-формат, достапна за печатење.
- [2] Р. Ачковски, Ј. Ангелов “Збирка задачи по надземни и кабелски водови“, ЕТФ–Скопје, Скопје, 2005 –Материјал достапен во копирница и на Web-страница на Факултетот.
- [3] Р. Ачковски “Упатство за решавање на програмската задача од областа на надземни водови “, ЕТФ–Скопје, Скопје, 2005 –Материјал достапен во копирница и на Web-страница на Факултетот
- [4] Р. Ачковски “Компјутерска програма за решавање на програмската задача од областа на надземни водови со упатство“, ЕТФ–Скопје, Скопје, 2005 –Материјал достапен во копирница и на Web-страница на Факултетот.

Б) РЕДОВНОСТ НА НАСТАВАТА И ВЕЖБИТЕ

Редовноста на предавањата и вежбите е **задолжителна** за сите студенти и таа е **услов за добивање потпис** на крајот од семестарот, за што ќе се води евиденција како на предавањата, така и на вежбите по овој предмет.

Студентите кои присуствувале на помалку од **67%** од часовите предвидени со распоредот нема да може да добијат потпис и ќе мора повторно да го слушаат овој предмет во идната учебна година.

В) ИЗРАБОТКА НА ПРОГРАМСКА ЗАДАЧА

Во текот на наставата се изработува програмска задача – „Проект на надземен вод“. Навремената изработка на програмската задача, до крајот на семестарот, е задолжителна и таа е услов за добивање потпис. Квалитетот на изготвената програмска задача се вреднува со најмногу **40 бода**.

Г) ДОМАШНИ ЗАДАЧИ

Во текот на наставата е предвидено студентите да добиваат извесен број домашни задачи (околу 8 до 10).

Домашните задачи **не се обврзни** за студентите. Секоја коректно решена домашна задача и предадена во форма на елаборат му носи на студентот бонус од определен број бодови, зависно од нејзината тежина. На тој начин вкупниот број бодови што може да се освои преку изработка на домашните задачи е најмногу **50 бода**.

Поените добиени преку бонусот за изработените домашни задачи имаат **трајно важење**, сè додека студентот не го положи испитот. Тие се собираат со резултатите од колоквиумите односно испитите и на тој начин се формира конечната оценка по овој предмет.

Д) НАЧИН НА ПОЛАГАЊЕ

д1) преку колоквиуми (вкупно 2 колоквиума);

д2) класично, преку писмен испит.

Д1) Полагање преку колоквиуми

Се полагаат два колоквиума во текот на семестарот. На секој колоквиум се добиваат задачи. Притоа секој колоквиум носи најмногу **100** бода, и тој се смета за положен ако кандидатот освои најмалку **40** поени. На секој колоквиум како и на писмениот испит е дозволено користење на литература.

Испитот се смета за положен ако кандидатот:

- ги положил обата колоквиума и збирно по тој основ, збирно, освоил најмалку **110** бода;
- вкупниот број бодови од обата колоквиума, вклучувајќи ги тука и бонус-поените добиени со изработката на програмската и домашните задачи (точки В и Г) изнесува најмалку **151** бод.

Студентите кои на таков начин го положиле испитот, но притоа не се задоволни од покажаниот успех, имаат право да полагаат, на крајот од семестарот, дополнителен уснен испит на кој можат само да ја поправат оценката. Усниот испит **не е задолжителен**. Тој може да донесе најмногу **30** бода.

Г) УСЛОВИ ЗА ПОЛОЖУВАЊЕ ИА ИСПИТОТ. ФОРМИРАЊЕ ИА ОЦЕИКАТА

Завршната оценка од испитот што се полага преку колоквиуми се формира на следниот начин:

бодови	151 – 170	171 – 190	191 – 210	211 – 230	≥ 231
оценка	6	7	8	9	10

Д2) Класичен начин на полагање

Кај класичниот начин на полагање најнапред се полага писмен дел од испитот на кој што се решаваат задачи. На писмениот испит е дозволено користење на литература.

Студентите кои освоиле најмалку **50** од можните максимални **100** бодови на писмениот дел, полагаат и втор, уснен, дел од испитот на кој се одговора на поставени теориски прашања.

Усниот дел се смета за положен ако студентот освоил најмалку **50** од можните максимални **100 бодови** што ги носи усниот дел од испитот.

Усниот дел од испитот може да се одложи, но само еднаш, и тоа до првата наредна сесија.

Важноста на писмениот дел од испитот е еднократна.

Студентот којшто го положил писмениот испит а притоа не го положил усниот дел ќе мора идниот пат да ги полага повторно обата испита.

Кај класичниот начин на полагање може да се освојат најмногу **290 поени** и тоа:

- 100 бода од писмениот дел од испитот;
- 100 бода од писмениот дел од испитот;
- 40 бода од изработка на програмски задачи.
- 50 бода од изработка на домашни задачи.

Завршната оценка од испитот што се полага на класичен начин, преку писмен и уснен испит, се формира како и во претходниот случај, на следниот начин:

бодови	151 – 170	171 – 190	191 – 210	211 – 230	≥ 231
оценка	6	7	8	9	10