

**УНИВЕРЗИТЕТ "СВ. КИРИЛ И МЕТОДИЈ" - СКОПЈЕ**  
**ФАКУЛТЕТ ЗА ЕЛЕКТРОТЕХНИКА И ИНФОРМАЦИСКИ ТЕХНОЛОГИИ**  
**ИНСТИТУТ ЗА ПРЕНОСНИ ЕЛЕКТРОЕНЕГРТЕСКИ СИСТЕМИ**

**Ристо Ачковски**  
**ТЕХНИКА НА ВИСОК НАПОН II**  
**(умножени предавања)**



**Скопје, февруари 2008 г.**

# 1. ВОВЕД

## 1.1. ПРЕДМЕТ НА ПРОУЧУВАЊЕ НА ТЕХНИКАТА НА ВИСОКИОТ НАПОН

Електроенергетските мрежи за пренос и распределба (дистрибуција) на електрична енергија се означуваат според напонското ниво со ознаката што се нарекува **номинален напон на мрежата**. Номиналниот напон на една трифазна електроенергетска мрежа се однесува на ефективната вредност на линискиот (меѓуфазниот) напон. Вистинскиот **погонски (работен) напон** во некоја точка од мрежата варира во текот на денот (обично околу својата номинална вредност) под дејство на разни фактори меѓу кои доминантен е промената на струите (моќностите) во елементите од системот.

За секоја мрежа, покрај номиналниот, се дефинира и **највисокиот напон на мрежата**. Тој ја претставува највисоката дозволена вредност на работниот напон што воопшто смее да се појави било кога во нормална работа на мрежата.

Освен досега воведените поими, во наредниот дел од текстот ќе се среќаваме и со поимот **највисок напон на опремата**. Тоа е ефективната вредност на линискиот напон за кој што е опремата во мрежата конструирана и при кој таа ќе може нормално да работи.

Секое повишување на напонот над највисокиот напон на опремата се нарекува **пренапон**. Пренапони не смее да има во нормални услови на работа туку само во ретки, случајни ситуации. Со пренапон се означува секоја ситуација кога фазниот напон (т.е. напонот помеѓу некоја фаза и земјата) или пак меѓуфазниот напон (напонот помеѓу две фази) ја надминува соодветната темена вредност на највисокиот напон на опремата. Ваквата дефиниција на пренапоните е во согласност со препораките на меѓународната електро-техничка комисија (IEC).

Изолацијата на опремата има задача галвански да ги оддели деловите од опремата што се под напон од оние нејзини делови коишто се заземјени или пак се наоѓаат на друг потенцијал. Таа е проектирана и изведена така што да може да работи трајно со највисокиот напон на опремата. Но во случај на појава на пренапон доаѓа до електричко напрегање на изолацијата кое зависи од амплитудата на пренапонот, неговите бранов облик и од неговото траење. Ако изолацијата не го издржи пренапонот тогаш ќе дојде до нејзино **разорно празнење**. Во тој случај таа ги губи своите диелектрички својства и започнува да спроведува струја како да е спроводник. Притоа тој губиток на нејзиното изолационо својство може да биде привремено или пак трајно а самата изолација во таа смисла може да биде **самообновлива** или **необновлива**.

**Самообновлива** е онаа изолација која по завршувањето на разорното празнење наполно ги обновува своите изолациони својства. За разлика од неа, **необновливата** изолација во случај на разорно празнење трајно ги губи (доаѓа до нејзино трајно оштетување) или пак не ги обновува во целост своите изолациони особини.

### *Поделба на изолацијата според начинот на нејзината употреба*

Според начинот на употребата, изолацијата се дели на:

- **надворешна** и
- **внатрешна**.

*Надворешната изолација* ја сочинуваат растојанијата во воздухот (воздушни растојанија) и површината на цврстата изолација (изолаторите). Таа е подложена на атмосферски влијанија какви што се влагата, загадувањето, температурата, сончевото зрачење, присуство на разни животни и друго.

*Внатрешната изолација* може да биде во цврста, течна или гасовита состојба и во принцип таа е заштитена од атмосферските и другите надворешни влијанија.

Самиот процес на разорното празнење кај необновливата изолација се нарекува **пробив (пробој)**, додека кај обновливата изолација тој се нарекува **прескок**.

Покрај досега споменатите нови поими во иднина ќе се среќаваме и со поимот **диелектрична цврстина**. Диелектричната цврстина на една изолација се дефинира преку напонот што таа изолација може да го поднесе. Според стандардите диелектричната цврстина на една изолација се определува со помош на следните напони (напонски напрегања):

- **конвенционален поднослив напон** и
- **статистички поднослив напон**.

*Конвенционалниот поднослив напон* е оној напон што изолациониот систем мора секогаш да го издржи без оглед на бројот на бројот на таквите изложувања на тој напон.

*Статистички подносливиот напон* е напонот кој што изолацијата ќе го издржи во 90% од напонските испитувања.

За заштита на изолацијата од опасните пренапони се применуваат заштитни средства шија задача е да ги ограничат пренапоните на дозволеното, ебзопасно, ниво. Основно заштитно средство на изолацијата во електроенергетските системи (ЕЕС) е **одводникот на пренапони** – уред кој по појавата на пренапонот во системот започнува да спроведува струја одведувајќи ја тој начин енергијата на пренапонот во земјата. По преставувањето на дејството на пренапонот одводникот го прекинува одведувањето (спроведувањето) на струјата и ја воспоставува својата претходна вредност на отпорноста која што е многу висока или, пак, бесконечно голема. Освен одводникот, за заштита од пренапони се применуваат и други заштитни средства кои ги ограничуваат пренапоните во системот.

Дисциплината "*Техника на висок напон*" се занимава со:

- Проучувањето на пренапоните во ЕЕС;
- Проучувањето на механизмот на разорното празнење во диелектриците;
- Мерењето на високите напони и големите струи;
- Работата на уредите што служат за генерирање на високи напони и високи струи;
- Постапките за испитување на опремата со високи напони и големи струи;
- Кординацијата на изолацијата и др.

Самиот поим "*координација на изолацијата*" се однесува на постапката со која се врши избор на изолационата цврстина на уредите (опремата) во системот во однос на пренапоните што можат да се јават во него, земајќи го притоа предвид и присуството на заштитните уреди од пренапони во ЕЕС. Затоа координацијата на изолацијата претставува сложена постапка на усогласување на изолационите карактеристики на опремаат со заштитните карактеристики на заштитните уреди во системот водејќи сметка не само за техничките туку и за економските аспекти на заштитата од пренапони.

## 1.2. ПРЕНАПОНИ

Според причината за нивното настанување пренапоните можат да се поделат на:

- **Надворешни** (атмосферски) пренапони и

- **Внатрешни** (комутациони или склопни) пренапони.

*Атмосферските пренапони* настануваат при атмосферските празнења (удари на гром) во елементите на ЕЕС или во нивна близина. Кога ќе дојде до директен удар на громот во еден објект на местото на ударот се појавуваат големи струи од редот на десетици па и стотина kA кои можат да бидат причина за појава на високи пренапони во објектите на ЕЕС. При атмосферски празнења во близина на електроенергетските објекти доаѓа до индуцирање на пренапони кои исто така можат да бидат опасни за елементите од мрежата, особено кога се работи за нисконапонски (НН) или среднонапонски (СН) мрежи. Атмосферските пренапони на местото на нивното настанување имаат апериодичен облик иако тие можат да предизвикаат бранови преодни процеси кои ќе генерираат пренапони со осцилаторен облик. Во фреквентниот спектар на пренапонскиот бран настанат при атмосферското празнење се појавуваат хармоници чија највисока фреквенција е од редот на 1 до 5 MHz. Овие хармоници одговараат на почетниот период од преодниот процес, т.е. на челото од пренапонскиот бран.

*Внатрешните (комутационите)* пренапони настануваат при разни комутации во ЕЕС. Според причината за нивното настанување тие се делат на:

- **Склопни или комутациони пренапони** кои што настануваат при склопни операции (вклучувања или исклучувања) на елементи од ЕЕС. Склопните пренапони траат многу кусо време, сè на сè дел од периодот на струјата со индустриска фреквенција 50 Hz. Нивната фреквенција варира од неколку стотини Hz до неколку десетини kHz иако понекогаш (во постројките изолирани со гасот SF<sub>6</sub>) можат да се јават преодни процеси со фреквенција од редот на MHz.
- **Пренапони при нагло растоварување во системот.**
- **Привремени (повремени) пренапони.** Тие траат подолго од атмосферските и од склопните пренапони а нивното траење изнесува од неколку делови од секундата па сè до неколку часови. Тие можат да бидат со индустриска фреквенција (50 Hz) но и со фреквенција која е повисока, па дури и пониска од индустриската. По големина ретко ја надминуваат вредноста на највисокиот напон на мрежата поради што, во принцип, не ја загрозуваат изолацијата на опремата но можат да предизвикаат проблеми во работењето на одделните апарати и заштитни уреди како што се, на пример, одводниците на пренапони, напонските мерни трансформатори и сл. Според причината за нивното настанување тие се делат на:
  - *пренапони поради несиметрија во погонот,*
  - *резонантни пренапони и*
  - *ферорезонантни пренапони.*

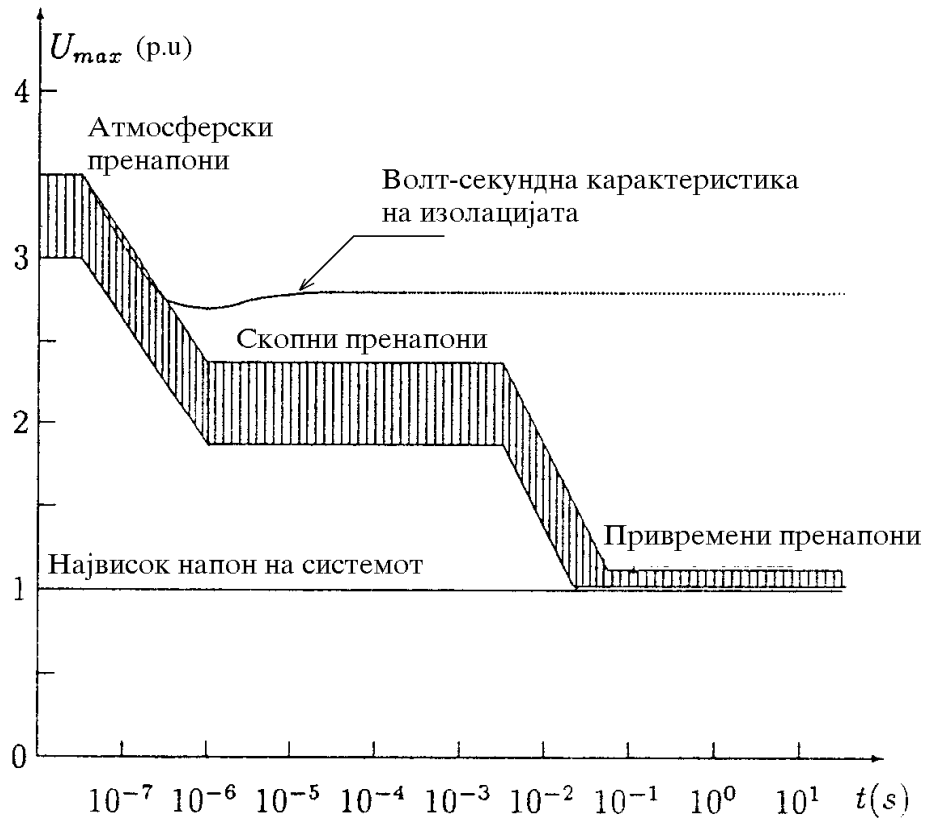
*Пренапоните поради несиметрија* во трифазните системи настануваат при појава на несиметрични дефекти (куси врски) или пти несиметричен прекин на напојувањето во мрежата.

*Резонантните пренапони* настануваат кога поради дефект во неа или пак поради определена нејзина вклопна состојба сопствената фреквенција на мрежата станува блиска до фреквенцијата на изворот на електрична енергија.

*Ферорезонантните пренапони* во една мрежа може да настанат доколку мрежата содржи нелинеарни индуктивности (на пример гранката на магнетизирање на енергетските трансформатори) кои можат да стапат во резонанција со капацитивноста на мрежата. Услови за тоа лесно можат да се создадат во нормален режим на работа на системот и притоа ферорезонанцијата може да настапи при основната фреквенција 50 Hz но и при фреквенција која што е пониска или повисока од основната.

На сликата 1.1 симболично се прикажани амплитудите и траењата на одделните типови пренапони. Напонот на ординатата е изразен во релативни единици (p.u. – per unit) во однос

на највисокиот напон на мрежата. Видно е дека атмосферските пренапони се најголеми по амплитуда но траат накусо време (неколку десетини  $\mu s$ ). Привремените пренапони, пак, имаат најмала амплитуда, нешто повисока од амплитудата на највисокиот напон на мрежата, но затоа пак траат најдолго, дури и со минути, итн. Волт-секундната карактеристика на изолацијата ја прикажува зависноста на прескочниот (пробивниот) напон на изолацијата од траењето на пренапонот.



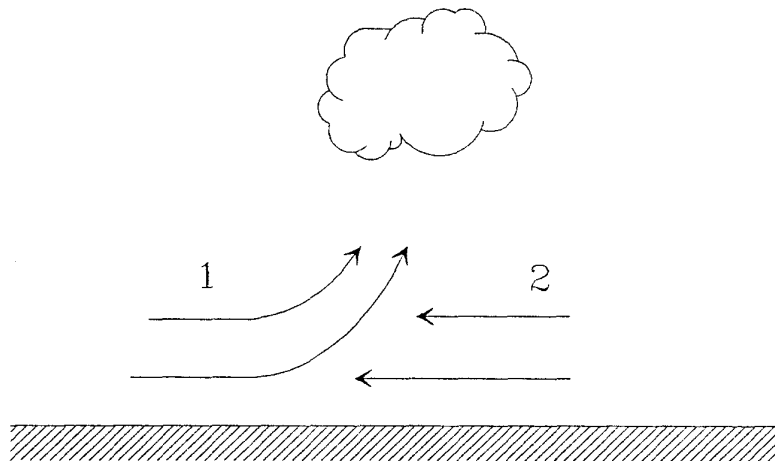
Слика 1.1. Амплитуди и времиња на траење на одделните видови пренапони

## 2. АТМОСФЕРСКО ПРАЗНЕЊЕ

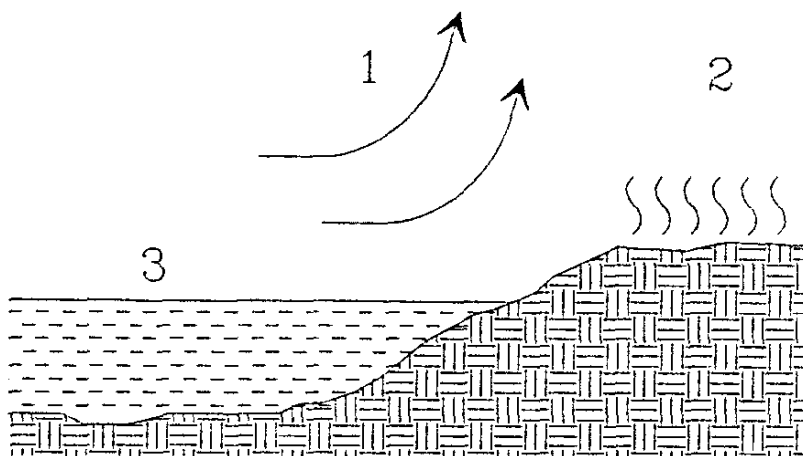
### 2.1. НАСТАНУВАЊЕ И УСЛОВИ ЗА ПОЈАВА НА ГРМОТЕВИЦИ

Грмежните (непогодните) облаци кои што се причина за појава на атмосферските празнења настануваат при нагорни струења на топлиот воздух заситен со водена пара, со концентрација не помала од 7 gr/kg. Таквите струења настануваат кога доаѓа до голем температурен пад во приземните слоеви на воздухот при истовремено силно загреана земјина површина. Во такви случаи настанува јако струење на долните слоеви воздух нагоре. Ваквите процеси се карактеристични за раните попладневни часови во пролетните и летните месеци.

Непогодни облаци се формираат и при судар на топли и влажни воздушни маси – појава наречена **фронт**. образувањето на фронтот е карактеристично за рамничарските предели на земјиштето. Тогаш ладната воздушна струја се пробива под топлата подигајќи ги топлиите слоеви воздух нагоре. Топлата воздушна струја тогаш започнува да се движи вертикално нагоре, како што е тоа прикажано на сликата 2.1.



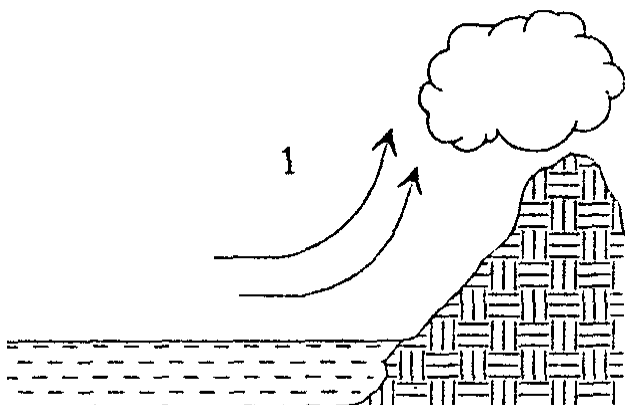
Слика 2.1. Формирање на фронт при судир на топли и ладни воздушни маси:  
1. топла воздушна струја; 2) ладна воздушна струја



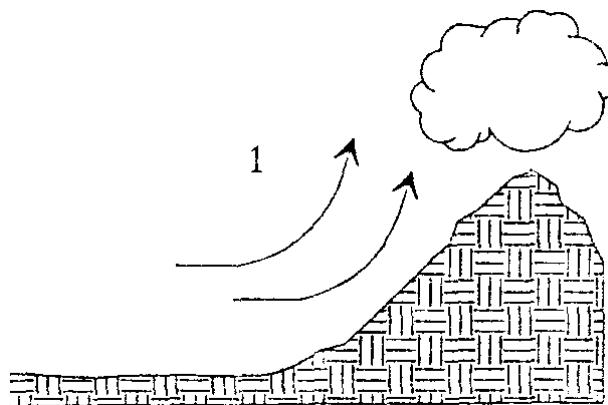
Слика 2.2. Нагорно струење на воздухот заради локалното загревање на плото:  
1) топла воздушна струја; 2) топла површина на копното; 3) море

Фронт може да настане и во зимскиот период – појава карактеристична за приморските крајбрежни области (слика 2.2). Во тој случај во топлиот крајбрежен појас по заоѓањето на сонцето доаѓа до струење на воздухот од морето кон копното. Бидејќи тлото е загреано под дејство на сончевите зраци, влажниот морски воздух започнува над копното да струи вертикално нагоре, како што е тоа прикажано на сликата 2.2.

Нагорно струење на топлиот влажен воздух настанува и во планинските предели. Тоа се случува обично кога планинското масив се протега во крајбрежните морски појаси, а таквата појава е прикажана на сликата 2.3. На сликата 2.4 е прикажан процесот на нагорно струење на топлиот воздух на копното.



Слика 2.3. Нагорно струење на топлиот воздух поради приморскиот релјеф



Слика 2.4. Нагорно струење на топлата воздушна струја заради копнениот релјеф

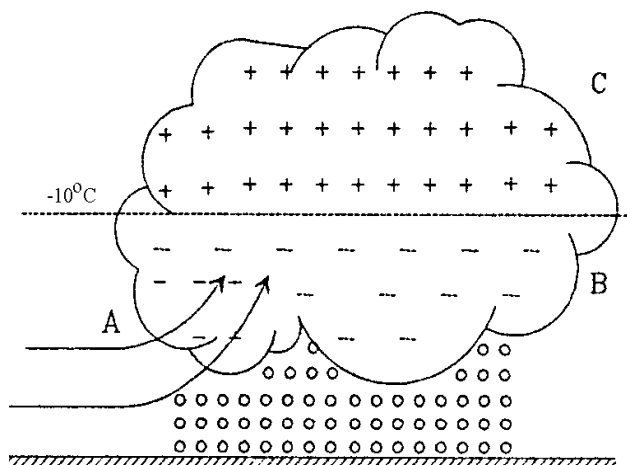
## 2.2. СОЗДАВАЊЕ НА ОБЛАЦИ

Со подигањето на топлиот влажен воздух нагоре доаѓа до негово постепено ладење а тоа доведува до кондензација на влагата што тој ја содржи во форма на микроскопски капки. Утврдено е дека процесот на кондензација е можен доколку во воздухот се наоѓаат цврсти хигроскопни честички со димензии од редот на големина од неколку микрони ( $\mu\text{m}$ ) до неколку десетини микрони, околу кои се кондензира влагата од воздухот. Таквите честички, кои ја овозможуваат кондензацијата на влагата од воздухот, се нарекуваат **јадра**. Тие настануваат со подигање на најситните честички прашина од површината на земјата или со подигање на продуктите на согорувањето (ситни честички чад, саѓи и др.) во највисоките слоеви од атмосферата. Влагата од воздухот се кондензира околу секоја таква честичка во форма на ситна капка чија димензија се движи од неколку  $\mu\text{m}$  до неколку десетини  $\mu\text{m}$ . Притоа во  $1\text{ cm}^3$  обично има неколку стотини такви ситни водени капки. Овие капки тие се сосема лесни и, зависно од јачината на вертикалното струење на воздушните маси, тие можат полака да паѓаат, да лебдат или дури и да се качуваат во погорните слоеви од облакот.

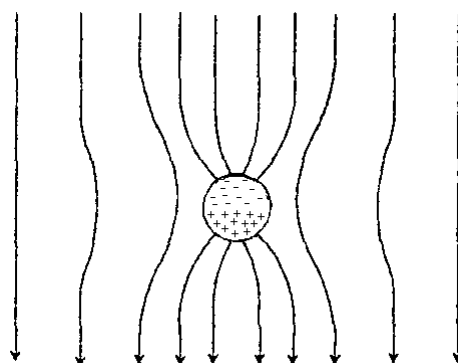
Кога таквите ситни капки ќе дојдат во горните слоеви од атмосферата, тие се преобразуваат во ситни кристали со форма на иглички или форма на мали плочки. Обично таа преобразба настанува на температури под  $-5^\circ\text{C}$ . Но на повиски температури ситните капки во облакот се судираат при своето движење и започнуваат да се окрупнуваат. Покрупните капки, како потешки, започнуваат да паѓаат надолу и да се судираат со ситните капки што стојат на нивниот пат. На тој начин тие стануваат сè поголеми. Крупните капки дожд паѓаат од поголеми височини во однос на поситните капки дожд.

Капките дожд можат да настанат и при температури под нулата. Тогаш во облакот може да има ситни кристали мраз но и капки кои сè уште не успеале да замрзнат. Таквите капки испаруваат дури и при температури под нулата а така настанатата водена пара се нафаќа на ситните кристали мраз кои почнуваат да окрупнуваат. Како такви тие стануваат потешки и започнуваат да паѓаат надолу. Ако наидат на топли воздушни маси тие се топат и во форма на капки дожд паѓаат на земјата. Во спротивно тие паѓаат на земјата во форма на снег.

Механизмот на создавање на електричните полнежи во облаците и нивното раздвојување на позитивни и негативни сè уште не е докрај објаснет иако тој станал предмет на проучување од оној момент кога Бенџамин Франклин во 1752 г. експериментално ја докажал електричната природа на громот. Постојат повеќе теории кои се бават со проучувањето на тој феномен, но во принцип сите постојни теории се единствени во констатацијата дека раздвојувањето на полнежите се случува за време на паѓањето на капките дожд од облакот и дека во горните слоеви на облакот се собираат позитивните полнежи, а во долните делови – негативните (сл. 2.5). Самото наелектризирање на капките дожд во облакот, пак, е последица на електростатичката индукција (сл. 2.6) под дејство на сталното електрично поле што владее помеѓу површината на земјата и стратосферата и кое на површината на земјата изнесува околу 100 V/m. додека на поголемите височини е помало и достигнува вредности од неколку V/m.



Слика 2.5. Распоред на полнежите во облакот според постојните теории



Слика 2.6. Поларизација на капките во електричното поле создадено од полнежите на земјата

### 2.3. ОСОБИНИ НА АТМОСФЕРСКОТО ПРАЗНЕЊЕ. МЕХАНИЗАМ НА НАСТАНУВАЊЕ НА АТМОСФЕРСКОТО ПРАЗНЕЊЕ

Врз основа на бројните фотографии, снимани со обични но и со специјални камери, како и врз основа на регистрациите на електричното и магнетното поле со помош на специјални антени и осцилоскопските снимки на струјата на атмосферското празнење, денес се располага со доволно информации за ефектите од самите атмосферски празнења иако и понатаму самиот механизам на нивното настанување сè уште не е целосно истражен.

Според досегашните сознанија развитокот на самото атмосферско празнење може да се подели во неколку фази и тоа:

- 1) прва фаза на точкасто (тивко) празнење;
- 2) втора фаза на скоковит лидер;
- 3) трета фаза на главно празнење и
- 4) четврта фаза на повеќекратни празнења (удари).

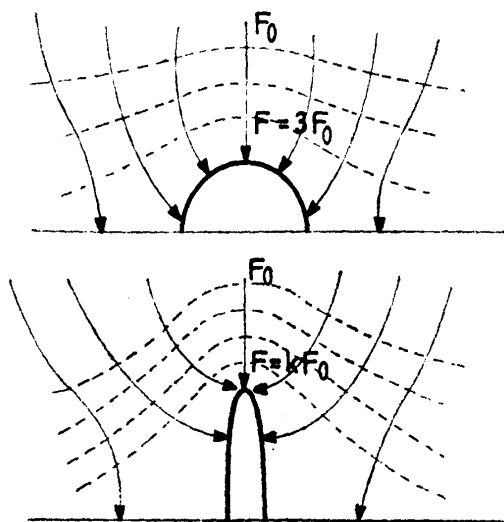


### 2.3.1. Прва фаза – појава на тивко празнење

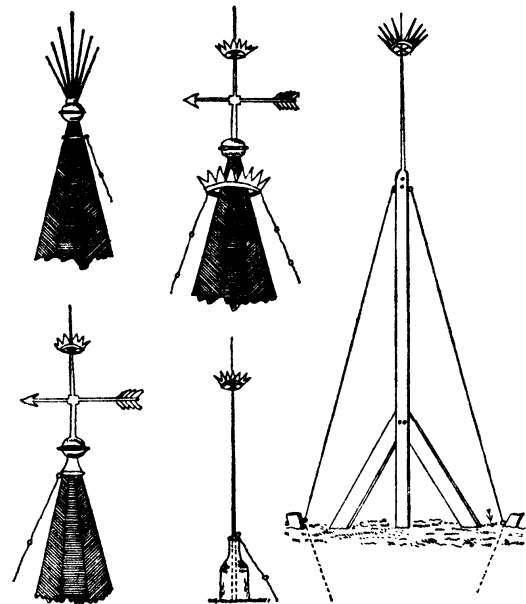
Кога центарот на полнежите во облакот се наоѓа на височина над тлото од редот на 1 km или помалку тогаш на површината од земјата се образува јако електрично поле кое предизвикува појава на корона на сите остри и зашилене предмети (слика 2.7) како што се гранките и лисјата од дрвјата, остри предмети на градежните објекти и слично. Ваквите појави и ефекти се јавуваат и на високите планини или пак на многу високите објекти какви што се на пример кулите, истакнатите остри шилести предмети, високите антени од радио и телевизиските предаватели, високите столбови од надземните водови, високите громобрани (слика 2.8) и др. Тогаш на острите краеве на ваквите објекти се појавува коронарно празнење кое што се нарекува уште и *оган на Св. Елм*. Ваквиот тип електрично празнење се нарекува *точкасто (тивко) празнење*. Тогаш на краевите од зашилените предмети доаѓа до силно изразена јонизација на воздухот под дејство на јакото електрично поле кое што е посилено од **критичното електрично поле** за воздухот.

Појавата на тивко празнење во воздухот при големи јачини на електричното поле се објаснува со процесот на **ударна јонизација**. За време на ударната јонизација доаѓа до повеќекратно и прогресивно зголемување на бројот на слободните електрони и јонизирани молекули на гасот – процес кој што се нарекува **лавина**. Услов за појава на лавината на јони и електрони е јачината на електричното поле да биде поголема од критичното поле за дадените атмосферски услови. **Критично поле** е она електрично поле при кое бројот на новонастанатите електрони под дејство на ударната јонизација е еднаков на бројот на електрони кои при судирите и интеракцијата со позитивните јони се неутрализираат т.е. исчезнуваат.

Процесот на тивко празнење во воздухот на местата каде што јачината на електричното поле ја надминува големината на критичното поле се нарекува **корона**. Короната е видлива ноќно време. Се манифестира како ореол од виолетова светлина која го опкружува објектот што коронира. Пропратена е со куси струјни импулси што се создаваат при образувањето на лавините.



Слика 2.7. Деформација на електричното поле околу зашилените предмети



Слика 2.8. Првите форми на громобрани од почетокот на XVIII век

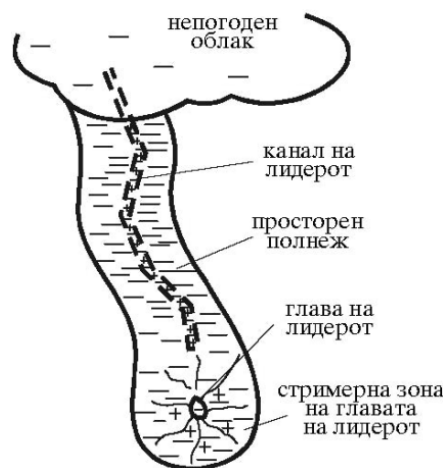
Овие струи, чија што големина ретко надминува  $1\text{mA}$ , се затвораат преку капацитивната врска на објектот што коронира и другата електрода која е површината на земјата (кога празнењето е иницирано од полнежите во облакот) или пак другата електрода е облакот (кога празнењето е иницирано на самиот објект).

Кога должината на лавината ќе стане поголема од својата критична должина а бројот на слободни електрони во воздухот надмине некоја критична граница, просторните електрични полнежи, создадени од ударната јонизација, доведуваат до локални деформации и појачувања на електричното поле а тоа, пак, создава услови за појава на нови, т.н. "секундарни" лавини. Секундарните лавини се формираат по должината линиите на најјакото електрично поле образувајќи на тој начин разгранета творба од тенки канали, наречени **стримери**.

Точкасто празнење настанува и во самиот грмежен облак, на водените капки или на кристалите мраз кај кои јачината на електричното поле ја надминува критичната вредност. Во условите што владеат во облаците во тој случај таа критична јачина на полето изнесува негде околу  $1\text{ kV/mm}$ . Процесот на точкастото празнење може да трае од неколку минути па сè до неколку часови. Се смета дека точкастото празнење што се јавува на капките вода или на кристалите мраз во облакот може да го иницира натамошниот процес и развиток на атмосферското празнење.

### 2.3.2. Втора фаза – појава на скоковит лидер

Под дејство на јакото електрично поле настанато во облакот доаѓа до индуцирање на електрични полнежи и деформација (издолжување) на водените капки. Индуцираните полнежи притоа се концентрираат на издолжените делови (врвови) од капката. Кога капката ќе се издолжи во доволна мера започнува процесот на тивко празнење од нејзините врвови и појава на лавини. Тие лавини се прошируваат во просторот во форма на стримери, во правец на линиите на електричното поле. Тогаш во каналот на стримерот тече некаква струја и притоа во него се ослободува енергија во вид на топлина. Таа топлинска енергија понатаму врши термичка јонизација зголемувајќи ја на тој начин спроводноста на стримерниот канал на неговиот почеток, на местото каде што електричното поле било најјако. Делот од така формираните јонизирани канали се нарекува **лидер** (сл. 2.9). Услов за претворање на стримерното празнење во канал на лидерот е струјата на стримерното празнење да има доволна јачина која ќе овозможи појава на термичка јонизација во каналот на стримерот.



Слика 2.9. Облик на лидерот на громот

Лидерот на громот, формиран на тој начин, претставува силно јонизиран канал со должина од 5 до 50 m кој што завршува со силно светлечки врв. Простирањето на овој канал

во просторот се одвива со брзина  $v$  која што е за околу 6 пати помала од брзината на светлината, т.е.

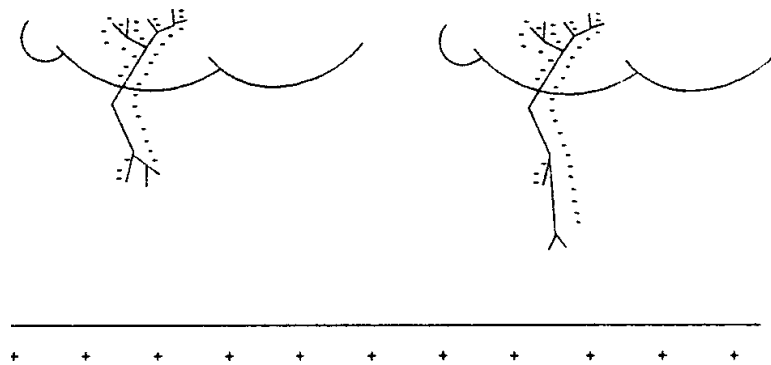
$$v \approx v_0 / 6 = 50 \text{ m}/\mu\text{s}.$$

После тоа процесот на простирање на лидерот привремено, за извесно време кое трае од 50 до 100  $\mu\text{s}$ , запира за повторно да продолжи со нов скок од врвот (главата) на каналот во ист или друг правец. Оваа фаза на атмосферското празнење се нарекува фаза на формирање на **скоковит лидер** затоа што движењето на лидерот во просторот се одвива во скокови, со мали меѓупаузи.

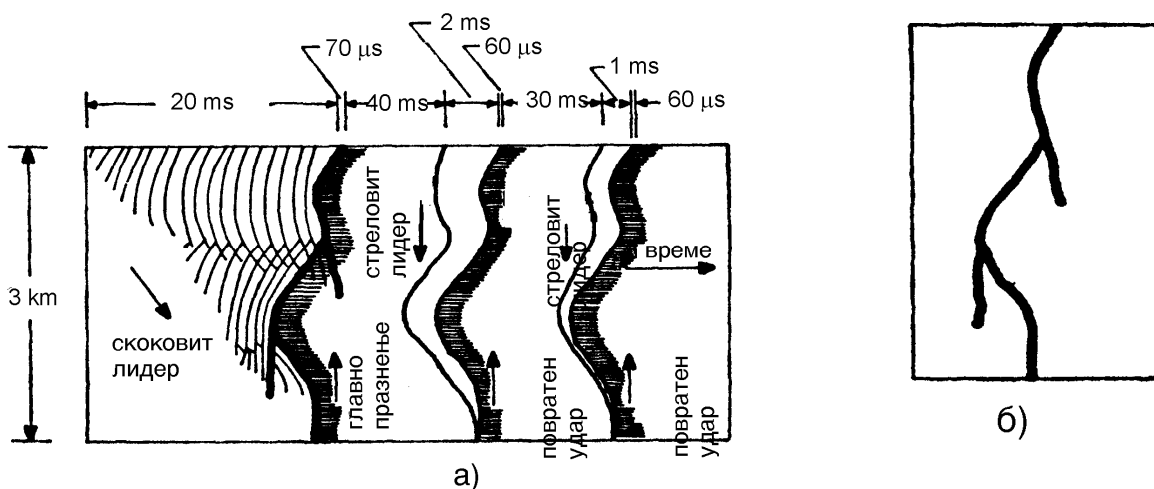
После секој скок концентрацијата на полнежи во лидерот, особено во неговата глава значително опаѓа и е потребно извесно време новите полнежи од облакот да дојдат преку каналот, до главата на лидерот. Така формираната струја на скоковитиот стример изнесува неколку стотини ампери.

За време на паузата во развојот на лидерот од неговата глава започнува да се развиваат нови стримери простирајќи се во околниот, дотогаш нејонизиран простор – потребни за изведувањето на нов скок на лидерот. Се смета дека привремените застои во развитокот на скоковитиот лидер, т.е. меѓупаузите помеѓу секои два последователни скока, се должат на потребата во каналот на лидерот и во неговата глава да се насобере доволна концентрација на електрични полнежи која ќе го овозможи новиот скок и натамошниот развој на лидерот.

На сликата 2.10 е даден упростен приказ на напредувањето на скоковитиот лидер во два последователни момента. Лево на оваа слика е прикажан почетокот, а десно завршната фаза т.е. последниот стадиум на развитокот на лидерот на громот, пред конечниот удар на земјата.



Слика 2.10. Две последователни фази во развојот на скоковитиот лидер



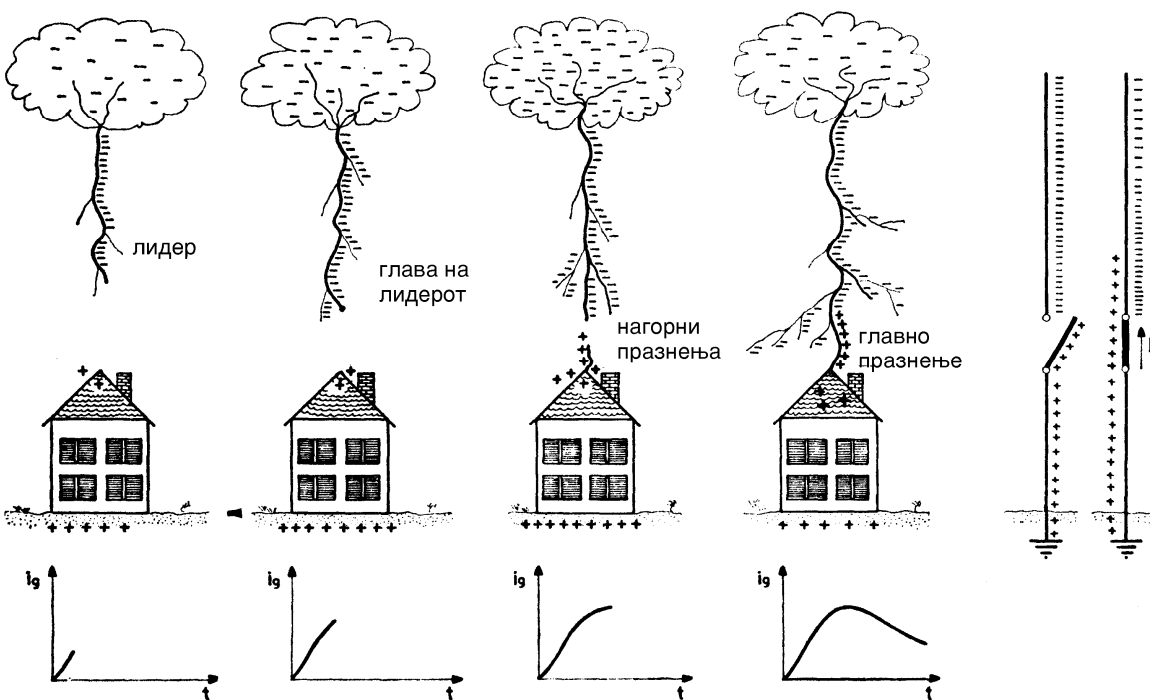
Слика 2.11. Снимка со ротирачка камера на целиот процес на развојот на атм. празнење

На сликата 2.11 е прикажан целосниот процес на атмосферското празнење, почнувајќи од фазата на скоковит лидер до фазата на главното и последователните празнења – онака како што бил снимен, со специјална, ротациона, камера.

Со напредувањето на скоковитиот лидер кон земјата, насекаде каде што тој се движи, избивањето на стримерите од неговата глава станува сè поизразено и поинтензивно. Со спуштањето на наелектризираниот лидер кон земјата и неговото доближување до одделните објекти на неа тој привлекува (индуцира) полнежи со спротивен знак. Колку главата од лидерот е поблиску до земјата толку тоа привлекување на полнежите со спротивен знак станува сè повеќе изразено. Јачината на електричното поле на површината од земјата нагло пораснува и на некои места таа може да ја надмине диелектричната цврстина на воздухот. Во тој случај започнува процесот на тивко празнење (Елмов оган). На истакнатите објекти на земјата, блиски до главата на лидерот, започнува формирањето на стримери кои започнуваат да се протегаат кон главата на скоковитиот лидер.

Во еден момент најблискиот стример ќе се сретне со главата на лидерот и тоа се означува како почеток на фазата на **главното празнење**. Доколку се работи за големи јачини на електричното поле на површината од земјата стримерите што се простираат од земјата / објектите на земјата кон главата на лидерот можат да прераснат во т.н. **нагорен лидер**. Ако надолниот и нагорниот лидер се сретнат во просторот над земјата тогаш нагорниот лидер се нарекува **поврзен лидер**.

Процесот на развојот и спуштањето на скоковитиот лидер кон еден објект на земјата и создавањето на нагорните стримери, заедно со нивното соединување и почетокот на фазата на главното празнење се скицирани на сликата 2.12. Самиот акт на главното празнење, кој што трае од 70 до 100  $\mu\text{s}$ , десно на оваа слика е симболично прикажан како вклучување на еден раставувач со што се овозможува почетокот на неутрализацијата на негативните полнежи во каналот на надолниот лидер.

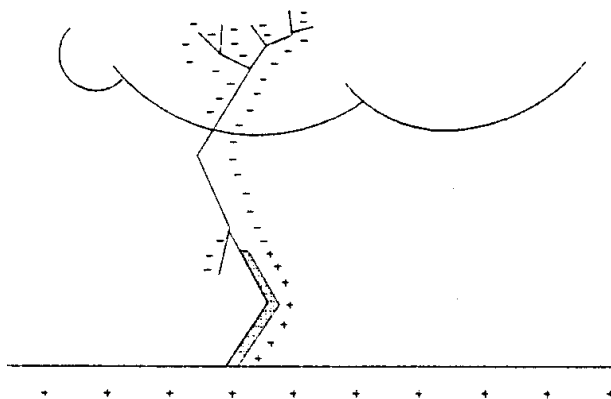


Слика 2.12. Приказ на целиот процес на атмосферското празнење во објект на земјата

### 2.3.3. Трета фаза – главно празнење

Во фазата на главното празнење доаѓа до постепена неутрализација на електричните полнежи што се содржат во каналот на громот. Таа неутрализација се одвива од земјата кон облакот, како што е тоа симболично прикажано на сликата 2.13. Самиот процес на главното празнење се карактеризира со појава на голема импулсна струја чија амплитуда има случајна вредност и се движи од неколку kA па сè до стотина kA.

Главното празнење предизвикува силен и впечатлив светлински и звучен ефект. Тие ефекти се последица на наглото зголемување на температурата на гасот во каналот на громот под дејство на високата струја. Празнењето може да предизвика разорни ефекти и штети кај објектите во кои удрил громот.



Слика 2.13. Главно празнење

Интензитетот на струјата на главното празнење не зависи од количеството електрични полнежи во облакот туку само од количеството електрицитет што се акумулирал во каналот на громот. Тоа значи дека процесот на главното празнење се гаси оној момент кога електричниот полнеж во каналот на громот целосно ќе се неутрализира. Брзината на простирање на главното празнење е некаде за околу 10 пати помала од брзината на светлината. Целата фаза на главно празнење, како што беше претходно споменато, трае од 70 до 100  $\mu$ s.

### 2.3.4 Четврта фаза – повеќекратни удари

Во над 50% од случаите не е доволно само едно главно празнење за да изврши целосна неутрализација на сиот електричен полнеж содржан во громносниот облак. Поради тоа честопати доаѓа до **повеќекратни удари** т.е. празнења. По завршувањето на првото главно празнење и после куса пауза, која трае неколку десетини ms, од облакот кон земјата, по претходно оформениот канал на громот, се развива атмосферско празнење кое што се нарекува **стреловиден лидер**.

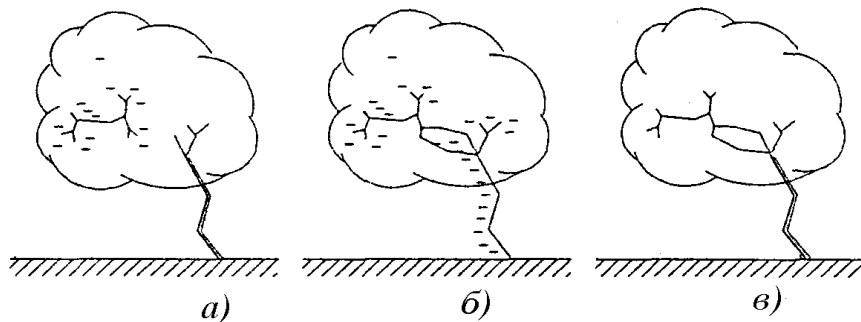
Стреловидниот лидер е значително побрз од скоковитиот лидер бидејќи тој се простира по веќе формираната струјна патека и не мора да формира јонизиран канал. Кога стреловитиот лидер ќе ја допре земјата или некој објект на земјата, се јавува второто главно празнење кое има послаб интензитет од првото. Сите празнења што се остваруваат после првото празнење се нарекуваат **последователни празнења**.

Самиот процес на формирањето на скоковитиот лидер, првото главно празнење и сите последователни празнења, се нарекува **комплетно празнење**. За време на едно комплетно празнење бројот на последователните празнења може да достигне и до 50 иако најчесто се работи за 3 до 4 последователни празнења.

На сликата 2.14 симболично е прикажан механизмот на настанување на повеќекратните празнења. Веднаш по првото главно празнење доаѓа до растоварување на некој од центрите со полнежи во облакот и до пад на неговиот потенцијал. Тоа ќе доведе до голема потенцијална разлика помеѓу тој центар и останатите центри на електричен полнеж во облакот и до појава на стримери помеѓу нив (сл. 2.14.а).

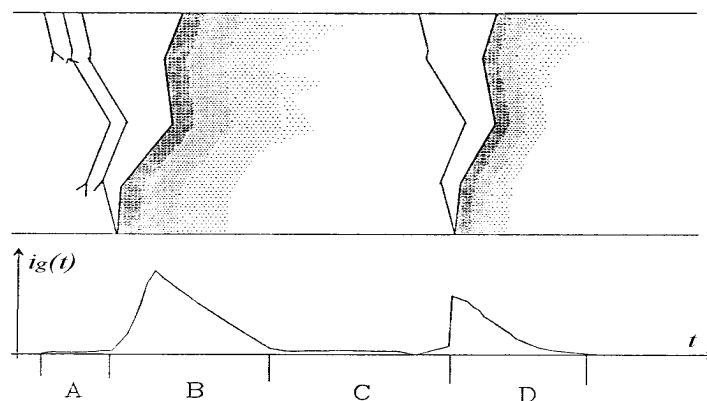
Кога стримерите во облакот ќе се соединат ќе настане прераспределба на полнежите помеѓу центрите во облакот и ќе дојде до повторно празнење на полнежот од облакот према земја, по веќе формиранiot спроводен канал на громот – појава која што беше наречена стреловиден лидер. Самата појава на стреловидниот лидер и неговото спуштање кон земјата – процес што се одвива континуирано, без застои, (за разлика од случајот при спуштањето на скоковитиот лидер), е прикажана на сликата 2.14.б.

Во моментот кога стреловидниот лидер ќе ја допре површината на земјата настанува *последователно главно празнење*. За време на тоа празнење повторно доаѓа до постепена неутрализација на електричниот полнеж што се содржи во каналот на громот, од земјата кон облакот, како што е тоа илустрирано на сликата 2.14.в.



**Слика 2.14. Процес на повеќекратни атмосферски празнења:**

- а) формирање на стримери внатре во облакот; б) формирање на стреловиден лидер;
- в) последователно празнење



**Слика 2.15. Просторно-временски дијаграм на развитокот на атмосферското празнење**

Дијаграмот на комплетното празнење, кој што обично се снима со специјални камери, има изглед како на сликата 2.15. Во горниот дел од оваа слика е прикажан просторно–временскиот дијаграм на развитокот на празнењето, додека во долниот дел од сликата е прикажан временскиот облик на струјата  $i_g(t)$  за време на целиот процес на комплетното празнење.

Од обликот  $i_g(t)$  се гледа дека амплитудата на струјата на громот е најголема при првото главно празнење. Затоа, пак, брзината на воспоставување на струјата во фазата на нејзиниот пораст (или како што се вели на челото на струјниот импулс), т.е. стрмнината на челото е најголема кај второто или кај некое од преостанатите последователни празнења.

Периодот на спуштањето на скоковитиот лидер е на дијаграмот  $i_g(t)$  означен со буквата А. Тој трае 10–20 ms и за тоа време во каналот на громот тече струја со јачина од редот на 100 А. Периодот на главното празнење, обележен со буквата В на дијаграмот  $i_g(t)$  на сликата 2.15, трае од 50 до 100  $\mu$ s. По завршувањето на главното празнење се појавува долготрајна струја со интензитет од 100–200 А и траење од неколку десетини до неколку стотини ms. Овој период на дијаграмот  $i_g(t)$  е означен со буквата С. Првиот последователен удар (празнење) е означен на дијаграмот  $i_g(t)$  со буквата D.

### 2.3.5. Штетни последици од атмосферското празнење

Доколку дојде до директен удар на громот во некој објект може да дојде до следните последици:

- високата температура на местото на допирот на каналот на громот и објектот може да предизвика механички оштетувања на објектот заради наглото ширење и прскање на материјалот;
- вжештените гасови од каналот на громот можат да предизвикаат палење па дури и пожар на запалливите објекти (дрвени или сламени покриви, запаллива конструкција на зградата и др.) од поширок размер;
- високата температура на местото на допирот може да предизвика топење на металните површини. При правилно избрани пресеци на металните спроводници оваа појава не е вообичаена;
- кај објектите кои што се заштитени со надворешна громобранска инсталација течењето на големата струја на громот низ металните спроводници што не се дел од громобранскиот систем на објектот може да предизвика нивно топење, но и нивно кинење под дејство на електродинамичките сили што притоа се јавуваат;
- ударот на громот во дрвја како и во дрвените столбови од надземните водови може да предизвика ниво палење или до нивно механичко разорување поради наглото ширење на испарената влага содржана во капиларите од навлажнетото дрво;
- повишениот потенцијал на заземјувачот од објектот во однос на потенцијалот на спроводните елементи внатре во објектот може да го загрози животот и здравјето на луѓето што престојуваат во него заради појава на опасни напони на допир и чекор;
- кај објектите кои што се заштитени со надворешна громобранска инсталација може да дојде до прескок помеѓу громобранската инсталација и нисконапонската електроенергетска инсталација, телефонската или некоја друга телекомуникациска инсталација во објектот. Тоа, пак, може да предизвика оштетување или целосно уништување на таа инсталација. Прескокот може да настане доколку мерките за изедначување на потенцијалите внатре во штитениот објект не се правилно изведени;
  - струјата на громот со своето индиректно дејство (електромагнетска индукција) може да предизвика оштетување на електричните, особено чувствителните електронски уреди.

## 2.4. ТИПОВИ НА АТМОСФЕРСКОТО ПРАЗНЕЊЕ

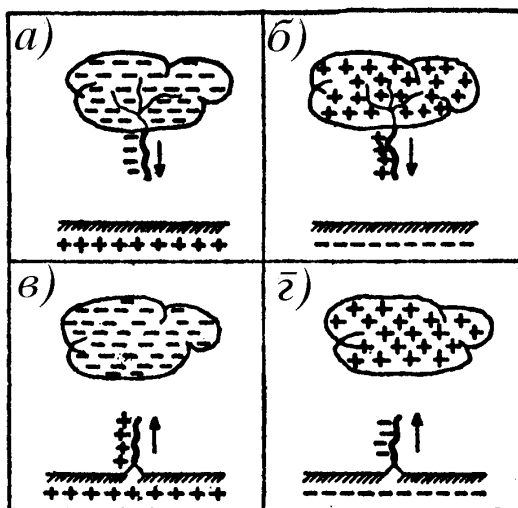
Празнењата во земјата или празнењата во објектите на земјата можат да се поделат на неколку начини (слика 2.16):

- **нагорни** или **надолни празнења** – поделба според правецот на простирање на лидерот на громот и
- **позитивни** или **негативни** – поделба според знакот на полнежот во громоносниот облак.

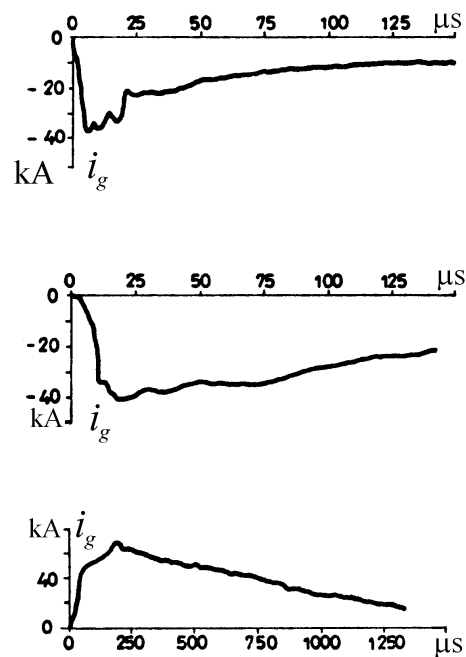
Ударот се смета за негативен ако громоносниот облак е наелектризиран негативно – и обратно. Празнењето се смета за надолно ако скоковитиот лидер се простира од облакот кон земјата. Обратно, празнењето е нагорно ако скоковитиот лидер се простира од земјата кон облакот.

Облаците се најчесто носители на негативни полнежи. Поради тоа најголем дел (80% – 90%) од атмосферските празнења се негативни. Исто така е забележано дека празнењата во ниските објекти како и празнењата во земјата се најчесто надолни. Единствено празнењата во исклучително високите објекти, какви што се, нпр. високите згради, телевизиските и антенските столбови и др., можат да имаат нагорна природа. Значи најголемиот дел од атмосферските празнења се *негативни и надолни*.

Утврдено е дека позитивните празнења секогаш се остваруваат со еден единствен удар. Иако позитивните празнења се многу поретки од негативните, тие се обично поопасни од негативните и имаат поголемо разорно дејство бидејќи амплитудите на струите кај позитивните празнења се обично поголеми од оние кај негативните празнења и можат да достигнат вредности од 100 па дури и 200 kA.



Слика 2.16а. 4 видови на атмосферското празнење



Слика 2.16б. Облици на струјата на атмосферското празнење

Кога главата на лидерот кај надолното празнење ќе се приближи до објектите на земјата што имаат изразени рабови и шилци, кај таквите рабови и шилци доаѓа до појава на интензивна корона и формирање на стримери коишто достигнуваат должина и повеќе од 1 m. Таквите стримери може да се претворат во нагорни лидери кои тргнуваат во пресрет на скоковиот лидер. Должината на таквите нагорни лидери е, по правило, многу помала од должината на самиот скоковит надолен лидер.

Покрај празнењата помеѓу облаците и земјата честопати доаѓа и до празнења на полнежите и помеѓу самите облаци. Тие се почести од претходните и се, во принцип,



помалку опасни бидејќи иако и тие можат да предизвикаат индуцирани пренапони во објектите на земјата, големината на тие пренапони е сепак значително помала од пренапоните што се јавуваат при празнењата на земјата и директните празнења во објектите на земјата.

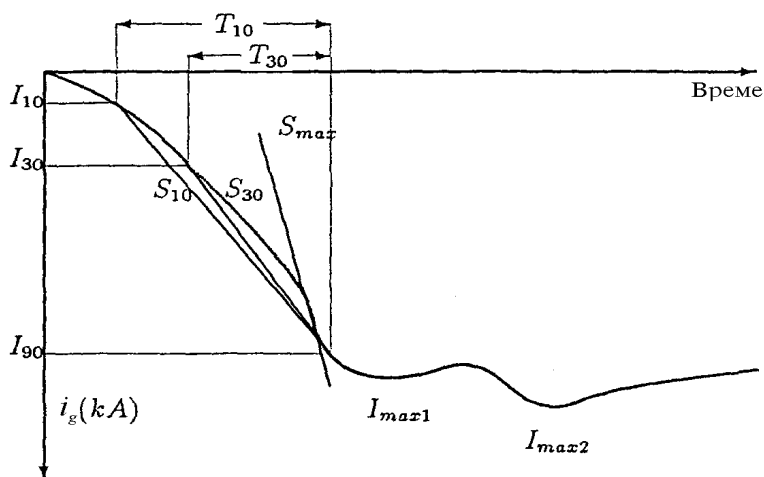
## 2.5. ПАРАМЕТРИ НА АТМОСФЕРСКОТО ПРАЗНЕЊЕ

За правилна проценка на степенот на загрозеност на објектите од атмосферските празнења неопходно е да се познаваат *електричните* и *метеоролошките* параметри на атмосферските празнења.

### Електрични параметри

- Основни електрични параметри на етно атмосферско празнење се следните:
- амплитудата на струјата на громот  $I_m$ ;
- обликот на струјата на громот;
- стрмнината на струјниот импулс  $S$ ;
- количеството на електричните полнежи  $Q$  што ќе протечат при првиот удар која ќе ги опфати струјата на скоковитиот лидер но и струјата на главното празнење;
- вкупното количество полнежи за време на комплетното празнење  $Q_\Sigma$ ;
- топлинскиот импулс на комплетното празнење  $A_\theta$ .

На сликата 2.17 е прикажан типичниот облик на негативниот струен импулс на првиот удар на атмосферското празнење. Од оваа слика може да се види дека струјниот импулс на громот има најчесто два максимума  $I_{max.1}$  и  $I_{max.2}$ . и дека стрмнината на струјата  $S$  во периодот на нејзиниот пораст (на челото на бранот) има променлива вредност. Одделните ознаки на оваа слика ги имаат следните значења:



Слика 2.17. Видови и облици на струјата на атмосферското празнење

- $I_{10}$  –струја која има вредност 10% од првиот максимум на струјата  $I_{max.1}$ ;
- $I_{30}$  –струја која има вредност 30% од првиот максимум на струјата  $I_{max.1}$ ;
- $I_{90}$  –струја која има вредност 90% од првиот максимум на струјата  $I_{max.1}$ ;
- $T_{10}$  – временски интервал помеѓу моментите кога настапуваат струите  $I_{10}$  и  $I_{90}$ ;
- $T_{30}$  – временски интервал помеѓу моментите кога настапуваат струите  $I_{30}$  и  $I_{90}$ ;

$S_{10}$  – средна стрмнина на импулсот во временскиот интервал  $T_{10}$ ;  $S_{10} = (I_{90} - I_{10})/T_{10}$

$S_{30}$  – средна стрмнина на импулсот во временскиот интервал  $T_{30}$ ;  $S_{30} = (I_{90} - I_{30})/T_{30}$

$S_{\max}$  – максимална стрмнина на струјата на импулсот која што се појавува во било кој момент на челото на струјниот импулс.

Во изминатите 50-тина години се вршени бројни и систематски мерења на параметрите на струјата на громот во поголем број земји во светот како на пример во САД, СССР, Италија, Чехословачка, Јужна Африка, Швајцарија и др. Најрепрезентативни и најцелосни резултати, како по времето на нивната регистрација, така и по нивната бројност, се резултатите од мерењата добиени во Швајцарија на две телевизиски антени на ридот Монте Сан Салваторе, под раководство на К. Бергер (Karl Berger) иако доста опсежни мерења се правени и во САД, а особено во Јужна Африка.

Анализите покажале дека параметрите на струјата на громот не се насекаде исти. Тие во најголема мера зависат од климатските услови, географската положба на земјата, надморската височина, конфигурацијата на теренот и др. Правени се обиди сите резултати од истражувањата вршени на разни места од светот и од разни автори да се обединат и да се формираат некаккви генерални веројатностни распределби на параметрите на струјата на громот кои ќе најдат својата примена во инженерската практика. За остварување на таа цел општо е прифатен статистичкиот пристап во третманот на параметрите на струјата на громот според кој тие претставуваат случајни променливи чии што функции на распределба подлежат на определни закони на распределба. Така, веќе постојат определени закони на распределба за амплитудата и за стрмнината на струјата на громот кои што се општо прифатени, а постојат и такви кои се вградени во разните национални стандарди на одделните земји и се применуваат при анализите на опасностите од опасни пренапони при атмосферските празнења. Во натамошниот дел од текстот ќе бидат прикажани некои од таквите, почесто употребувани, статистички закони за распределба на параметрите на струјата на громот.

#### **а) Закони за распределба на амплитудата на струјата на громот**

Во изминатите децении доста познат и прифатен беше *експоненцијалниот закон* на распределба за амплитудата на струјата на громот. Тој се применуваше во некогашниот Советски Сојуз, а и денес сè уште се применува во Русија, кај нас и во низа други источноевропски земји. Според овој закон веројатноста  $P(I)$  дека ќе се појави струја на громот чија што амплитуда  $I_m$  ќе биде помала или еднаква на струјата  $I$ , изнесува:

$$P(I) = 1 - \exp\left(-\frac{I}{a}\right) = 1 - e^{-\frac{I}{a}}. \quad (2.1)$$

Величината  $P(I)$  ја претставува *функцијата на распределба* на амплитудата на струјата на громот, која уште се нарекува *кумулятивна функција на распределба*. Во тој случај *комплементот* на функцијата на распределба  $P(I)$ , којшто обично се бележи со ознаката  $\bar{P}(I)$ , ќе биде:

$$\bar{P}(I) = 1 - P(I) = e^{-\frac{I}{a}}. \quad (2.2)$$

ја дава веројатноста дека амплитудата на струјата на громот ќе ја надмине вредноста  $I$ .

Покрај величините  $P(I)$  и  $\bar{P}(I)$ , ќе ја споменеме и величината  $f(I)$  која се нарекува *густина на веројатноста* на амплитудата на струјата на громот. Таа се дефинира со помош на релацијата (2.3):

$$f(I) = \frac{\partial P}{\partial I} = \frac{1}{a} \cdot e^{-\frac{I}{a}} \quad (2.3)$$

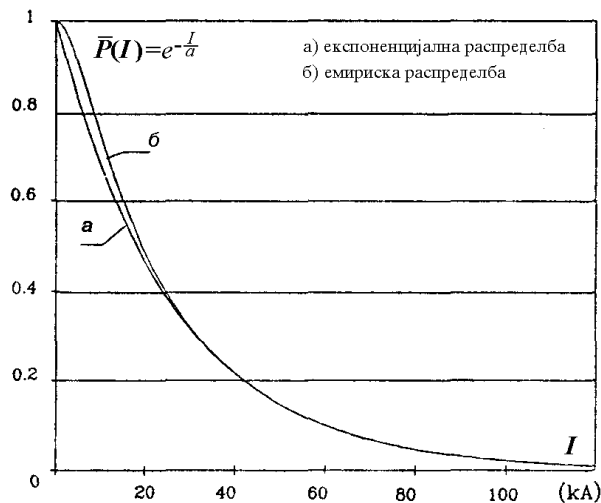
врз основа на која произлегува релацијата (2.4)

$$P(I) = \int_{-\infty}^I f(x) \cdot dx = \int_0^I f(x) \cdot dx . \quad (2.4)$$

Величината  $a$  која што фигурира во законот за распределба (2.1) односно (2.2) има димензија на струја. Според руските автори тој изнесува:

- $a = 26,1$  kA за рамничарски предели и
- $a = 13,0$  kA за планинските предели.

На сликата 2.18 е прикажана кумулативната функција за распределбата на функцијата, според релацијата (2.2) (крива  $a$ ) и емпириската функција (закон) за распределба на амплитудата на струјата на громот добиена по експериментален пат со регистрација на амплитудите на струјата на громот од поголем број атмосферски празнења во некогашниот СССР (крива  $b$ ). Очигледно е големото совпаѓање на емпириската и териската распределба на овие два закона.



**Слика 2.18. Закон за распределба на амплитудата на струјата на громот:**  
(а) Експоненцијален закон (б) и емпириски закон на распределба

Во последно време многу почеста е примената на логаритамско-нормалниот закон на распределба (или т.н. лого-нормалниот закон на распределба) според кој логаритамот од амплитудата на струјата на громот подлежи на познатиот нормален или Гаусов закон на распределба. Според овој закон функцијата на густината на распределбата на амплитудата на струјата од громот  $f(I)$  изнесува:

$$f(I) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot I_{sr} \cdot \sigma_{\ln I}} \cdot e^{-\left(\frac{\ln I - \ln I_{sr}}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma_{\ln I}}\right)^2} = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot I_{sr} \cdot \sigma_{\ln I}} \cdot \exp\left[-\left(\frac{\ln I - \ln I_{sr}}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma_{\ln I}}\right)^2\right] \quad (2.5)$$

Во (2.5) се воведени следните обележувања:

$f(I)$  – густина на веројатноста на амплитудата на струјата на громот;

$I$  – случајна вредност на амплитудата на струјата на громот;

$I_{sr}$  – средна вредност на амплитудата на струјата на громот;

$\sigma_{\ln I}$  – стандардна девијација на логаритмот на струјата на громот.

Лого–нормалниот закон за распределба може да се искаже и на поинаков, конвенционален, начин, преку Гаусовата функцијата на распределба  $F(x)$ :

$$F(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot \int_{-\infty}^x e^{-\frac{t^2}{2}} \cdot dt, \quad (2.6)$$

$$x = \frac{\ln I - \ln I_{sr}}{\sigma_{\ln I}} = \frac{\ln(I/I_{sr})}{\sigma_{\ln I}}. \quad (2.7)$$

Изразот (2.6) ја дава веројатноста за појава на гром со амплитуда чијашто вредност нема да ја надмине величината  $I$ . Според тоа веројатноста  $P(I)$  дека амплитудата на струјата на громот нема да ја надмине вредноста  $I$ , во согласност со изразот (2.6), ќе биде:

$$P(I) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot \int_{-\infty}^x e^{-t^2/2} \cdot dt = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot \int_{-\infty}^{\ln(I/I_{sr})/\sigma_{\ln I}} e^{-t^2/2} \cdot dt \quad (2.9)$$

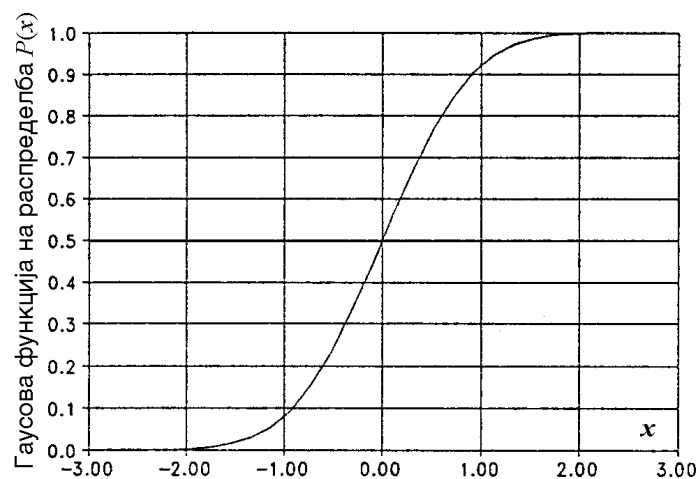
Комплементот на веројатноста  $P(I)$ , означена со  $\bar{P}(I)$ , кој ја дава веројатноста дека амплитудата на струјата од громот ќе ја надмине вредноста  $I$ , ќе биде:

$$\bar{P}(I) = 1 - P(I) = 1 - F(x); \quad x = \frac{\ln(I/I_{sr})}{\sigma_{\ln I}}. \quad (2.10)$$

Интегралот (2.6) не може да се реши во затворена форма. Неговата вредност обично се отчитува од соодветни табели. Една таква подетална табела е дадена во Прилогот 1 од овој учебник, додека во табелата 2.1 се дадени некои вредности на оваа функција.

**Табела 2.1. Вредности на функцијата на нормалната распределба  $F(x)$**

$x$	-3.0	-2.5	-2.0	-1.8	-1.5	-1.4	-1.3	-1.2	-1.1	-1.0
$F(x)$	0.00135	0.00621	0.02275	0.03593	0.06681	0.08076	0.09680	0.11507	0.13567	0.15866
$x$	-0.9	-0.8	-0.7	-0.6	-0.5	-0.4	-0.3	-0.2	-0.1	0.0
$F(x)$	0.18406	0.21186	0.24196	0.27425	0.30854	0.34458	0.38209	0.42074	0.46017	0.50000
$x$	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
$F(x)$	0.53983	0.57926	0.61791	0.65542	0.69146	0.72575	0.75804	0.78814	0.81594	0.84134
$x$	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.8	2.0	2.5	3.0
$F(x)$	0.86433	0.88493	0.90320	0.91924	0.93319	0.94520	0.96407	0.97725	0.99379	0.99865



**Слика 2.19. Функција на нормалната (Гаусова) распределба**

Изгледот на функцијата на распределба  $F(x)$  според нормалниот (Гаусов) закон е прикажан на сликата 2.19.

Врз основа на долгогодишните регистрации на амплитудите на струјата на громот е дојдено до табелата 2.2. во која се прикажани параметрите  $I_{sr}$  и  $\sigma_{ln I}$  за одделните типови атмосферски празнења.

**Табела 2.2. Средна вредност  $I_{sr}$  на амплитудата и стандардна девијација  $\sigma_{ln I}$  на струите на громот**

Вид на атмосферското празнење	$I_{sr}$ (кА)	$\sigma_{ln I}$	Број на регистрации
Прв негативен удар	30	0,53	101
Последователни нег. удари	12	0,57	135
Позитивен удар	35	1,21	26

Работна група на американското здружение IEEE, задолжена за следење на оваа проблематика изработи пред 20–тина години методологија за проценка на ризиците кај преносните надземни водови од атмосферски пренапони. Во неа се предлага упростен закон за распределба на амплитудата на струјата на громот во обликот (2.11):

$$\bar{P}(I) = \frac{1}{1 + \left(\frac{I}{31}\right)^{2,6}} \quad (2.11)$$

кој дава слични резултати како и лого-нормалниот закон на распределба (2.9) со параметри според табелата 2.2, што го прави подесен за практична примена:

Во изразот (2.11) со  $I$  е означена вредноста на амплитудата на струјата, а со  $\bar{P}(I)$  веројатноста дека таа ќе биде надмината.

**Пример 2.1.** Колкава е веројатноста  $P$  да дојде до негативно атмосферско празнење чија амплитуда на струјата на громот  $I_m$  ќе ја надмине вредноста  $I = 30$  кА.

**Решение:**

а) Пресметка според експоненцијалниот закон на распределба. Според експоненцијалниот закон за распределба, опишан со релацијата (2.2), за рамничарски предели ( $a = 26,1$  кА) ќе имаме:

$$P = \bar{P}(I) = \exp(-I/a) = e^{-\frac{30}{26,1}} = 0,317.$$

б) Пресметка со помош на IEEE–моделот (2.11). Ако за пресметка на бараната веројатност го примениме моделот предложен од работната група на здружението IEEE (т.н. IEEE – модел), според изразот (2.11) ќе добиеме:

$$P = \frac{1}{1 + (30/31)^{2,6}} = 0,521.$$

в) Пресметка според лого-нормалниот закон на распределба. Доколку истата задача ја решиме применувајќи го лого-нормалниот закон за распределба, бараната веројатност  $P$  ќе ја

добиеме на следниот начин. Најнапред со помош на изразот (2.7) ќе ја пресметаме величината  $x$ :

$$x = \frac{\ln(I/I_{sr})}{\sigma_{\ln I}} = \frac{\ln(30/30)}{0,53} = 0,$$

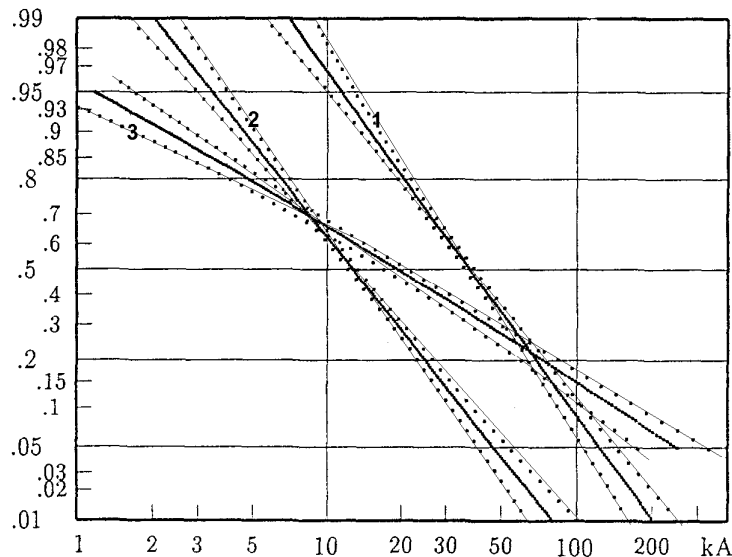
$$F(x) = F(0) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot \int_{-\infty}^0 e^{-t^2/2} \cdot dt = 0,5;$$

$$P = \bar{P}(I) = 1 - F(0) = 1 - 0,5 = 0,5.$$

Значи пресметката на веројатноста  $P$  дека амплитудата на струјата на громот ќе ја надмине вредноста  $I = 30$  kA, извршена на три различни начини, даде три различни резултати.

■ ■ ■

На сликата 2.20 се прикажани, во логаритамски размер, функциите на распределба на амплитудата на струјата на громот добиени врз база на мерења на терен. На апсцисната оска е нанесена амплитудата на струјата што треба да биде надмината, во логаритамски размер, додека на ординатата се нанесени, исто така во логаритамски размер, веројатностите дека тие струи ќе бидат надминати. Правите означени на сликата со дебели линии се аналитички апроксимации со лого-нормалниот закон на распределба на вистинските (емпириските) закони на распределба добиени со регистрација на струите на громот на терен. Со точки и тенки прави се означени интервалите во кои може да се очекува отстапување на теориската апроксимација од емпириската распределба, со ризик помал од 5%.



**Слика 2.20. Функции на распределба на амплитудите на струјата на громот апроксимирани со лого-нормалниот закон:**

(1) за првите негативни удари; (2) за последователните негативни удари; (3) за позитивните удари

**б) Закони за распределба на стрмнината на струјата на громот**

Како што беше изложено во претходниот дел, струјата на громот претставува униполарен импулс кој релативно брзо ја постигнува својата максимална вредност и потоа постепено опаѓа со брзина значително помала од брзината со која расте на челото на

импулсот. Кога гром со амплитуда  $I_m$ , ќе удри во некој објект на самиот објект се воспоставува пренапон чија темена вредност  $U_{\max}$  може да биде опасна за самиот објект. Ако со  $R$  ја означиме отпорноста на распростирање на заземјувачот со кој што е заземјен објектот, а со  $L$  ја означиме индуктивноста на објектот, тогаш напонот  $U$  што се воспоставува на објектот погоден од громот, грубо посматрано, се состои од две компоненти:

$$U = U_R + U_L = R \cdot i_g + L \cdot di_g / dt, \quad (2.12a)$$

додека темената вредност на воспоставениот пренапон  $U_{\max}$ , приближно, ќе биде:

$$U_{\max} \approx R \cdot I_m + L \cdot S_{\max}. \quad (2.12b)$$

Затоа од интерес за оценка на вистинските опасности од атмосферските пренапони е, меѓу другото, и познавањето на големината на стрмнината  $S$  ( $S = di_g/dt$ ) на струјата на громот на неговото чело, (мислејќи притоа на максималната стрмнина  $S_{\max}$ ) бидејќи, како што се гледа, таа претставува, исто како и амплитудата на струјата на громот  $I_m$ , влијателен параметар од кој битно зависи степенот на загрозеност на објектите од атмосферски пренапони.

Истражувањата вршени во Швајцарија покажуваат дека негативните атмосферски празнења имаат помали амплитуди во однос на амплитудите кај позитивните празнења но затоа, пак, кај нив стрмнината на челото на струјниот импулс  $S$  е многукратно поголема. Статистиката што произлегла од тие истражувања вели дека кај 50% од негативните празнења максималната стрмнина на челото ја надминала вредноста 20 kA/ $\mu$ s, додека кај позитивните атмосферски празнења 50% од струјните импулси има максимална стрмнина на челото која ја надминала вредноста од само 2 kA/ $\mu$ s.

Во втората половина на изминатиот век долго време во употреба беше експоненцијалниот закон на распределба (2.13) според кој, веројатноста  $\bar{P}(S)$  дека максималната стрмнина на струјата на громот  $S_{\max}$  ќе ја надмине вредноста  $S$  изнесува:

$$\bar{P}(S) = e^{-\frac{S}{b}}. \quad (2.13)$$

Параметарот  $b$  што фигурира во изразот (2.13), според руски автори, има вредност:

$b = 15,65$  kA/ $\mu$ s – за рамничарски предели и

$b = 7,8$  kA/ $\mu$ s – за планински предели.

Експоненцијалниот закон на распределба (2.13) како едноставен е многу погоден за брзи аналитички проценки на ризиците од превисоки атмосферски пренапони.

Сепак денес во светот сè почесто се применува логаритамско-нормалниот закон на распределба за максималната стрмнина на струјата на громот од обликот (2.14), кој се смета за поточен:

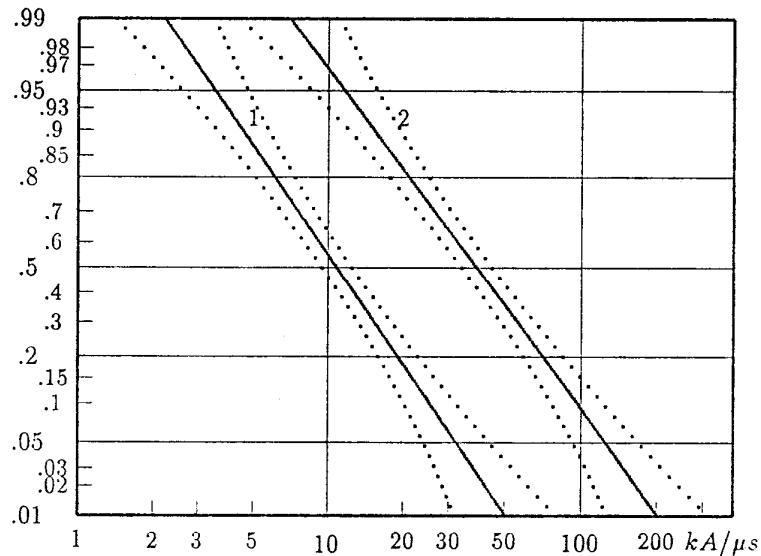
$$P(S) = F(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot \int_{-\infty}^x e^{-t^2/2} \cdot dt; \quad x = \frac{\ln(S/S_{sr})}{\sigma_{\ln S}} \text{ и} \quad (2.14a)$$

$$\bar{P}(S) = 1 - P(S). \quad (2.14b)$$

Параметрите  $S_{sr}$  и  $\sigma_{\ln S}$ , го имаат истото значење како и во претходниот случај со распределбата (2.5)÷(2.7) за амплитудата на струјата на громот. Вредностите за средната вредност  $S_{sr}$  и стандардната девијација  $\sigma_{\ln S}$  на максималната стрмнина на струјата на челото, добиени врз основа на мерењата на Бергер (Berger), Андерсон (Anderson) и Кронингер (Kröniger), се прикажани во табелата 2.3.

**Табела 2.3. Средна вредност  $S_{sr}$  и стандардна девијација  $\sigma_{lnS}$  на стрмнината на струјата на громот**

Вид на атмосферското празнење	$S_{sr}$ (kA/ms)	$\sigma_{lnS}$	Број на регистрации
Прв негативен удар	12	0,535	92
Последователни негативни удари	40	0,76	122
Позитивни удари	2,4	1,54	21



**Слика 2.21. Функции на распределба на стрмнината на струјата на громот апроксимирани со лого-нормални распределби:**  
 1) први негативни удари; 2) пратечки негативни удари

Најновите регистрации на максималната стрмнина на струјата на громот, вршени во 80-тите години од страна на Андерсон и Ериксон (Errikson) со современи дигитални уреди покажуваат дека вистинските вредности на максималната стрмнина се скоро двојно поголеми во однос на оние, регистрирани со визуелно отчитување од класичните осцилоскопи и прикажани во табелата 2.3. Значи конечните параметри за стрмнината на струјата на громот сè уште не се јасно определени и тие се и понатаму предмет на истражувања на научниците.

На сликата 2.21 е прикажан законот на распределба на максималната стрмнина на струјата на громот нацртан во логаритамски размер. Тој е добиен од Андерсон и Ериксон (Errikson) со современи дигитални уреди, при нивните последни истражувања.

**в) Вкупно количество електрицитет на струјата на громот**

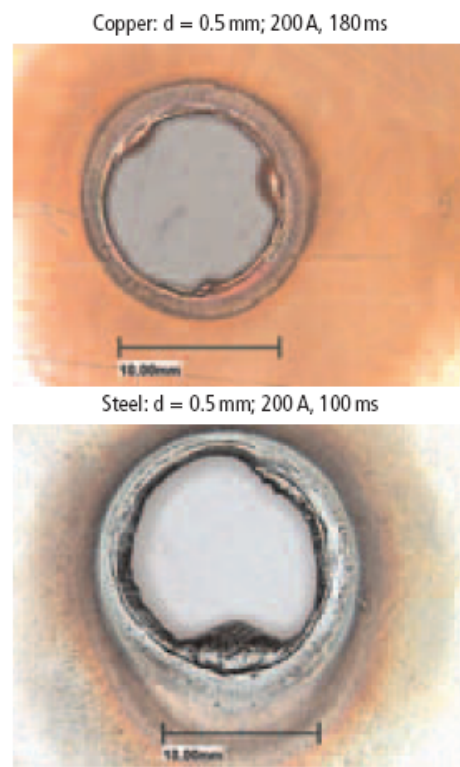
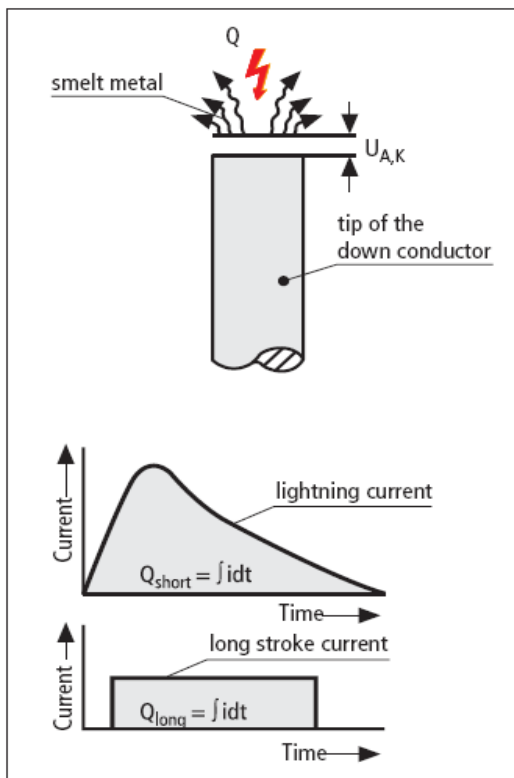
Покрај величините  $I_m$  и  $S_{max}$ , од кои зависи максималната вредност на пренапоните, битна карактеристична величина за громот е и вкупното количество електрицитет  $Q$  кое што се неутрализира за време на ударот/ударите. Во просек величината  $Q$  изнесува десетина кулони (C) иако понекогаш таа може да достигне и вредност од 300 C. Оваа величина е значајна за проценките на количеството топлина што се ослободува на местото на ударот на громот и на термичките ефекти што се јавуваат на металните површини на местото на ударот, неопходни заради спречување на нивното топење.



Оштетувања на местото на ударот на громот со струја 200 А за време од 100 ms

На она место каде што струјата на громот, во форма на електричен лак, ќе допре некаков метален предмет доаѓа до ослободување на топлинска енергија која може да предизвика локално топење на металот. Вкупното количество топлинска енергија  $W$  што се ослободува на тој начин може да се пресмета како производ од вкупното количество електрицитет на громот што се неутрализира и катодниот пад на напон  $\Delta U_{A,K}$  на местото на допирот кој што изнесува негде околку 10 V, т.е.:

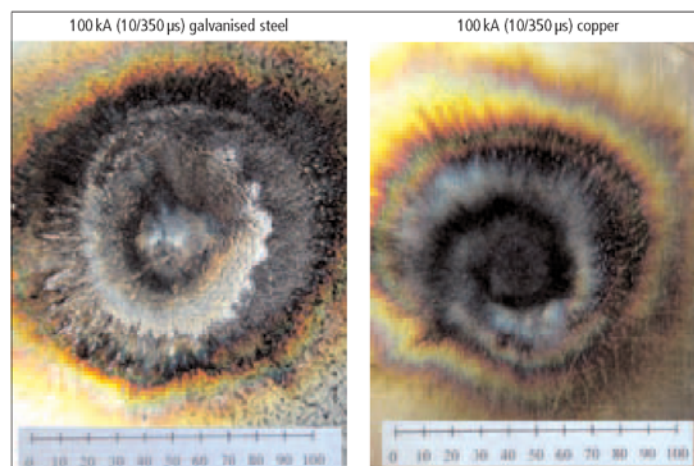
$$W = Q \cdot \Delta U_{A,K} \quad (2.15)$$



Конверзија на енергијата во точката на ударот на громот

Оштетувања на местото на ударот на громот со струја 200 А за време од 100 ms

Слика 2.22. Термички ефекти од струјата на громот поради појава на електричен лак на местото на ударот



Слика 2.23. Прогорување на материјалот поради електричниот лак на местото на ударот

За димензионирање на громобранските инсталации при нормалните барања за сигурност обично се усвојува дека количеството електрицитет што со себе го носи струјата на громот изнесува  $50^{\circ}\text{C}$ , но при построги барања за сигурност се оперира со вредноста од  $300^{\circ}\text{C}$ .

Во табелата 2.4 се прикажани статистичките вредности (средна вредност  $Q_{sr}$  и стандардна девијација на логаритмот  $\sigma_{\ln Q}$ ) на вкупното количество електрицитет  $Q_{\Sigma}$  од комплетното празнење под претпоставката дека овие случајни величини подлежат на лого-нормалниот закон за распределба.

**Табела 2.4. Параметри на распределбата на вкупното количество електрицитет  $Q_{\Sigma}$**

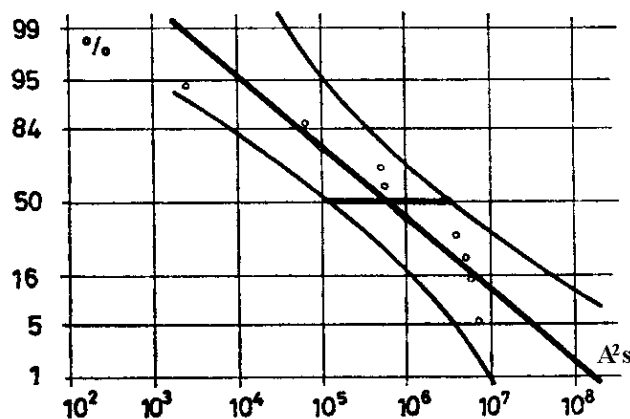
Вид на атмосферско празнење	$Q_{sr}$ (C)	$\sigma_{\ln Q}$
Први негативни удари	5,2	0,93
Пратечки негативни удари	1,4	1,2
Пратечки комплетни удари	7,5	1,03
Позитивни празнења	80	0,86

**г) Топлински импулс на струјата на громот**

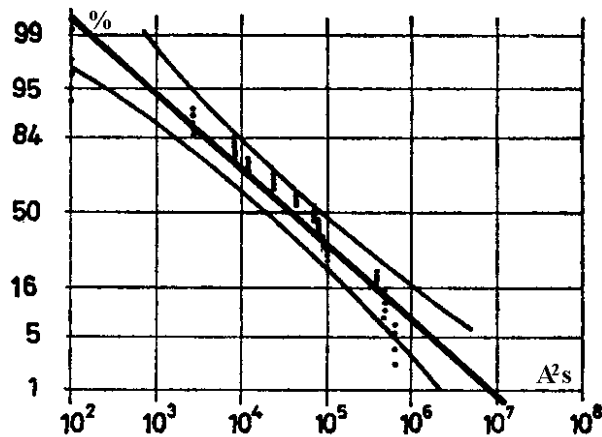
Струјата на громот при минувањето низ металните спроводници од громобранската инсталација поради Џуловиот ефект ослободува во нив топлина. За проценка на таа топлина битно да се знае уште една карактеристична величина на струјата на громот – а тоа е т.н. "топлински" или "квадратен импулс"  $A_{\theta}$  бидејќи од неа зависи потребниот пресек на спроводниците. Топлинската енергија  $W_{\theta}$  што се ослободува во спроводник со активна отпорност  $R$  за време на протечувањето на струјата на громот е пропорционална на квадратниот импулс  $A_{\theta} = \int i_g^2(t) \cdot dt$ . Под претпоставката дека за време на течењето на струјата на громот отпорноста на елементот е  $R = \text{const.}$ , таа топлинска енергија ќе биде:

$$W_{\theta} = R \cdot \int i_g^2(t) \cdot dt = R \cdot A_{\theta} \tag{2.16}$$

Експериментално е утврдено дека топлинскиот импулс  $A_{\theta}$  претставува случајна величина која што подлежи на некој закон на распределба. На сликите 2.24 и 2.25 се прикажани статистичките распределби на топлинскиот импулс  $A_{\theta}$  добиени со регистрацијата на струјата на громот. Притоа сликата 2.24 се однесува на позитивните, додека сликата 2.25 на негативните атмосферски празнења.



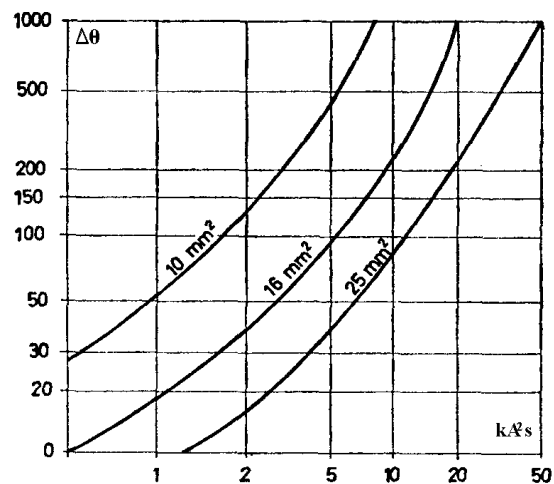
**Слика 2.24. Статистичка распределба на топлинскиот импулс  $A_{\theta}$  за позитивните удари**



Слика 2.25. Статистичка распределба на топлинскиот импулс  $A_\theta$  за негативните удари

Од прикажаните дијаграми на сликите 2.24 и 2.25 се гледа дека позитивните празнења имаат топлински импулс кој што е за 10–тина пати поголем од истиот кај негативните празнења. Но имајќи предвид дека негативните празнења се многу позачестени отколку позитивните, загревањето на спроводниците сепак се пресметува со статистичките податоци за негативните удари.

Така, на пример, од дијаграмот на сликата 2.25 се гледа дека најголемата вредност на топлинскиот импулс што може да се јави кај негативните празнења изнесува околу  $10^7 \text{ A}^2\text{s} = 10 \text{ kA}^2\text{s}$ . Оваа вредност ќе биде надмината во помалку од 1% од сите негативни удари т.е. многу е малку веројатно дека ќе се јави гром со квадратен импулс поголем од  $10 \text{ kA}^2\text{s}$ . Што тоа значи за загревањето на спроводниците (земјоводите) од еден громобран може да се види од дијаграмот на слика 2.26.



Слика 2.26. Зависност  $\Delta\theta(A_\theta)$  за Cu спроводници

На овој дијаграм се прикажани зависностите на надтемпературата  $\Delta\theta$  што ќе се постигне при загревањето на бакарни спроводници со пресеци 10, 16 и  $25 \text{ mm}^2$  – респективно, под дејство на атмосферско празнење со определена вредност на квадратниот импулс. Од него се гледа дека, на пример, за пресеци  $10 \text{ mm}^2$  квадратен импулс од  $1 \text{ kA}^2\text{s}$ , кој што кај негативните празнења според дијаграмот од сл. 2.24 може да биде надминат само кај околу 10% од негативните празнења, ќе му ја подигне температурата на спроводникот за околу  $55^\circ\text{C}$ . Исто така може да се заклучи дека кај пресекоот Cu  $25 \text{ mm}^2$ , квадратен импулс од  $10 \text{ kA}^2\text{s}$ , кој што кај негативните празнења може да биде надминат само кај околу 1% (сл. 2.24) од негативните празнења, ќе му ја подигне температурата на спроводникот за околу  $80^\circ\text{C}$ , што не може ниту да го стопи ниту пак да го оштети спроводникот.

Надтемпературите  $\Delta\theta$  што се постигнуваат кај бакарните спроводници со пресек од 10 до  $25 \text{ mm}^2$ , за разни вредности на квадратниот импулс  $A_\theta$ , се прикажани во табелата 2.5. Оваа табела приближно важи и за спроводници од челик (челични поцинкувани ленти) но за пресеци кои што се за околу 10 пати поголеми. Од неа гледаме дека пресекоот Cu  $25 \text{ mm}^2$  е доволен да ги издржи практично сите струјни импулси на громовите со негативен поларитет.

**Табела 2.5. Надтемпература  $\Delta\theta$  што се постигнува при загревањето на бакарен спроводник под дејство на струјата на громот во зависност од квадратниот импулс  $A_\theta$  ( $\text{kA}^2 \text{s}$ )**

Надтемпература $\Delta\theta$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	Cu 10 mm <sup>2</sup>	Cu 16 mm <sup>2</sup>	Cu 25 mm <sup>2</sup>
10	0,19	0,50	1,24
30	0,57	1,47	3,59
50	0,92	2,37	5,79
100	1,70	4,35	10,64
150	2,39	6,12	14,94
200	2,99	7,66	18,66
500	5,60	14,35	35,05
1000	8,23	21,09	51,49

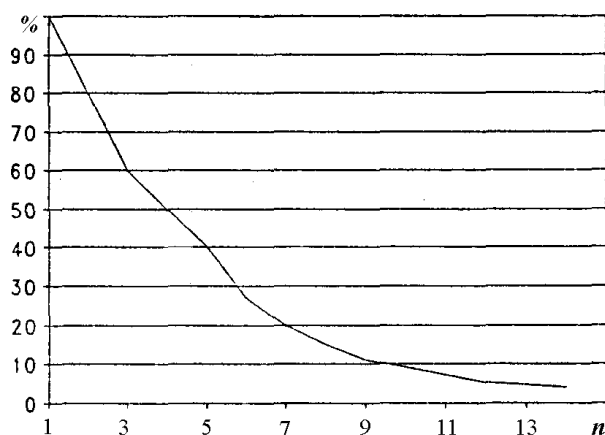
Најновите сознанија говорат, според некои автори, дека и квадратниот импулс  $A_\theta$ , кој исто така претставува случајна величина, може, како и другите параметри на громот, да се опише со лого-нормалниот закон на распределба. Во тој случај параметрите  $A_{\theta sr}$  и  $\sigma_{\ln A}$  на топлинскиот импулс, добиени со статистичка обработка на регистрираните атмосферски празнења, се прикажани во табелата 2.6.

**Табела 2.6. Параметри на распределбата на квадратниот импулс според најновите мерења**

Вид на атмосферско празнење	$A_{\theta sr}$ ( $\text{A}^2 \text{s}$ )	$\sigma_{\ln A}$
Први негативни удари	$5,5 \cdot 10^4$	1,38
Пратечки негативни удари	$6,0 \cdot 10^3$	1,38
Позитивни празнења	$6,5 \cdot 10^5$	1,94

**д) Број на последователни празнења при удар на гром**

Веќе беше кажано дека над 50% од негативните атмосферски празнења се повеќекратни, т.е. покрај првиот удар, кој е пропратен со најголема амплитуда, обично следат уште неколку последователни удари, но со помали амплитуди. На сликата 2.27 е прикажана веројатноста за појава на повеќекратни празнења кај негативните удари, добиени по статистички пат.



**Слика 2.27. Веројатност за надминување на определен број удари на громот**

### г) Годишен број на атмосферски празнења на земјата

Општо е прифатено дека основен показател за интензитетот на атмосферските празнења е "густијата на празнењата во земјата"  $N_g$ . Тоа е т.н. "просечен годишен број на удари на громот на  $1 \text{ km}^2$ " и има димензија на (удари/ $\text{km}^2$ , годишно). Истражувањата на овој показател покажале дека тој е цврсто врзан (корелиран) со еден од општите параметри на громот кој исто така служи како мерило за интензивноста на атмосферските празнења во некој регион или област, а тоа е т.н. *керауничко ниво*  $T_d$ . Керауничкото ниво се дефинира како *просечен број на денови со грмотевици во годината* за едно географско подрачје. Овој број се определува со повеќегодишни набљудувања и регистрации на појавата на грмотевици. Притоа секој ден од годината во кој што ќе се регистрира барем една грмотевица се смета за ден со грмотевици.

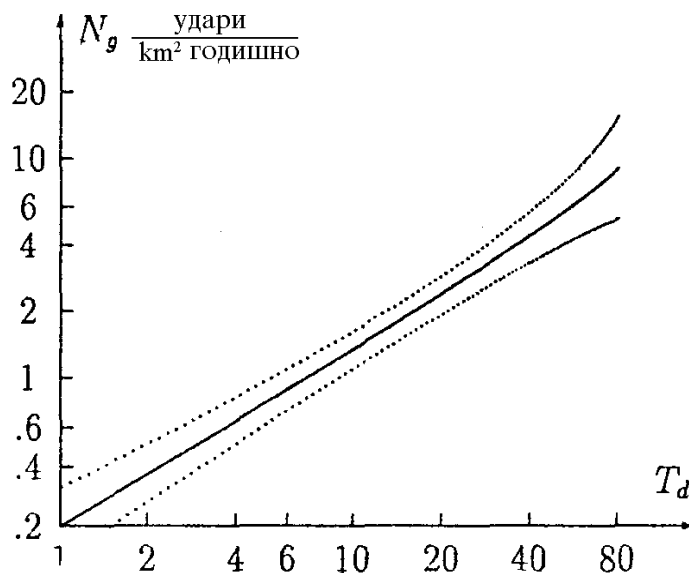
Керауничкото ниво  $T_d$  зависи најмногу од географската ширина на земјата (областа) на која се однесува. За Еврпските земји карактеристично е овој број да се движи помеѓу 20 и 40 грмежни денови годишно. За северните земји (Шведска, Норвешка и др.) тој број изнесува само неколку денови во годината (5–10 дена/год.) но затоа за земјите околу екваторот неговата вредност може да биде и блиску до бројката од 200 денови со грмотевици годишно.

Керауничкото ниво за областа на која се протега Република Македонија, според керауничката карта на Република Македонија, издадена од Управата за хидрометеоролошки работи во 2000 г. (сл. 2.28), се движи од 20 до 50 грмежни денови годишно, или во просек, тој изнесува некаде околу  $T_d = 35$  денови со грмотевици годишно. Но, според зачестеноста на регистрираните настани на далекуводите во некои региони (Западна Македонија, долина на реката Треска и сл.), тој број е поголем дури и од 50 грмежни денови годишно.



Сл. 2.28. Керауничка карта на Република Македонија

Така, на пример, во Студијата за зголемување на степенот на доверливост на далноводот 110 kV Осломеј – Самоков – Скопје 3, изработена на ЕТФ-Скопје во 2004 година, врз основа на статистиката за испадите на овој далновод во изминатите петнаесетина години, е проценето дека регионот низ кој што минува овој далновод би требало да и припаѓа на областа со керауничко ниво од 50 до 60 денови со годишно, а пресметките вршени во оваа Студија покажуваат дека, бројот  $T_d$  за теренот низ којшто минува овој далекувод треба да изнесува негде околу 57,2 денови/годишно.



Сл. 2.29. Зависност  $N_g(T_d)$  добиена на база на 310 регистрирани празнења во земјата

Врз основа на статистичката обработка на 310 регистрирани празнења во земја во 80-тите години (Андерсон) добиен е дијаграмот од сликата 2.29, на кој што е прикажана корелацијата помеѓу густината на атмосферските празнења и годишниот бројот на денови со грмотевици, т.е. зависноста  $N_g(T_d)$ . Врз основа на тој дијаграм е добиена емириската релација (2.17) која што е денес најчесто во употреба.

$$N_g = 0,04T_d^{1,25}, \text{ (удары/км}^2, \text{ год).} \quad (2.17)$$

Во табелата 2.7 е прикажана зависноста  $N_g(T_d)$ , истабелирана со помош на изразот (2.17).

Табела 2.7. Зависност на површинската густина  $N_g$  од бројот на грмежни денови  $T_d$

$T_d$ (ден/год.)	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
$N_g$ (удары/км <sup>2</sup> , год)	0.30	0.71	1.18	1.69	2.24	2.81	3.41	4.02	4.66	5.32	5.99	6.68

## 2.6. БРОЈ НА УДАРИ НА ГРОМОТ ВО НАДЗЕМНИТЕ ОБЈЕКТИ

### 2.6.1. Удари на гром во објекти на земјата

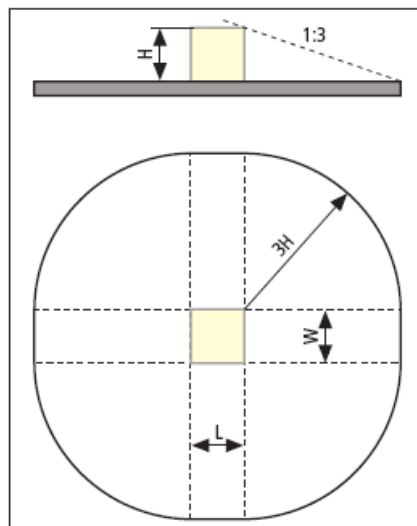
Постапката за определување на бројот на директите удари  $N_d$  во објекти на земјата се темели врз препораките ИЕС кои се во употреба веќе подолго време насекаде во светот, а се вградени и во голем број национални стандарди (нпр. VDE, JUS и др.).

### Еквивалентна прифатна површина

Бројот на директните удари  $N_d$  во објекти на земјата се дефинира на база на средногодишната густина на атмосферските празнења  $N_g$  и т.н. **еквивалентна прифатна површина** на објектот  $A_d$  која што се нарекува уште и "**атрактивна површина**". Под еквивалентна прифатна површина на еден објект се подразбира површината на хоризонталното тло која ќе има иста зачестеност на директните удари на громот како и посматраниот објект. Затоа нејзиното правилно одредување претставува една од главните задачи на секоја громобранска заштита.

Според ИЕС стандардите еквивалентната прифатна површина  $A_d$  на еден осамен објект се определува во пресекот на површината на земјата и рамнината што минува низ врвот од објектот, наведната во однос на хоризонталната рамнина во однос 1:3. Со ротирање на косата рамнина околу објектот, во пресекот со тлото се добива геометриско место на точки кое што ја ограничува и ја дефинира еквивалентната прифатна површина, како што е тоа прикажано на сликата 2.30.

Во случајот кога станува збор за објект во форма на паралелопипед со должина  $L$ , ширина  $W$  и височина  $H$ , атрактивната површина што би била изложена на атмосферски празнења, сега "екранирана" од тој објект, се пресметува со помош на релацијата (2.18) која што е во согласност со сликата 2.30.



Слика 2.30. Атрактивна површина за осамен објект со димензии  $L \cdot W \cdot H$

$$A_d = L \cdot W + 6H \cdot (L + W) + 9\pi H^2. \quad (2.18)$$

Според тоа просечниот годишен број на директни удари на громот во објектот  $N_d$ , изразен во (удари/годишно) ќе го добиеме со помош на релацијата (2.19).

$$N_d = N_g \cdot A_d \cdot C_d \quad (2.19)$$

Во оваа релација се воведени следните обележувања:

$N_g$  – густина на празнења облак – земја (удари/ $\text{km}^2$ , год);

$A_d$  – еквивалентна прифатна површина на објектот, пресметана според (2.18), изразена во ( $\text{km}^2$ );

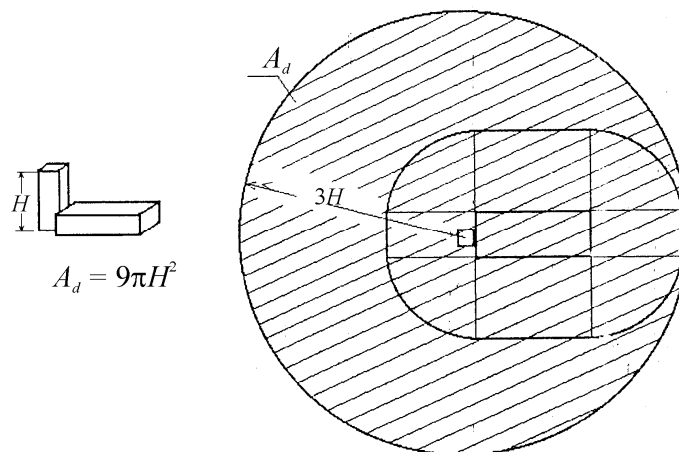
$C_d$  – коефициент на околината, којшто води сметка за влијанието на околната средина што го опкружува објектот (вид на теренот, присуство на дрвја, други објекти и станбени згради и сл.).

Вредностите на коефициентот на околина  $C_d$ , според постапката определена со ИЕС, се определуваат со помош на табелата 2.8.

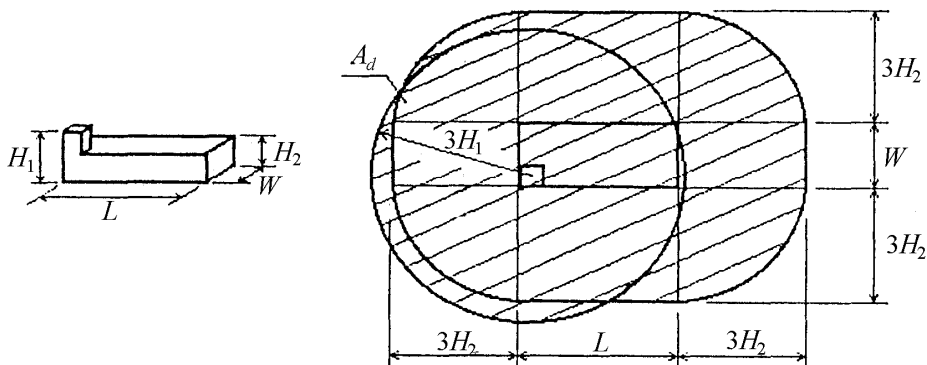
**Табела 2.8. Вредности на коефициентот на околина  $C_d$  во зависност од позицијата на објектот и од околината што го опкружува**

Позиција (релативна локација) на објектот	$C_d$
Објект опкружен со згради или други објекти со иста или поголема височина (дрвја, столбови, ...)	0,25
Објект кој што е опкружен со помали објекти (згради)	0,50
Осамен објект. Нема други објекти во неговата близина на растојание помало од $3H$	1,00
Осамен објект, поставен на врвот од рид, планина, превој или планински срт	2,00

Во случаите кога објектот има посложена форма, постапката за определување на изложената површина со помош на која ќе се определува годишниот број на удари на гром во објектот е исто така посложена. За некои почесто среќавани случаи во практиката таа е дефинирана на сликите 2.31, 2.32 и 2.33.

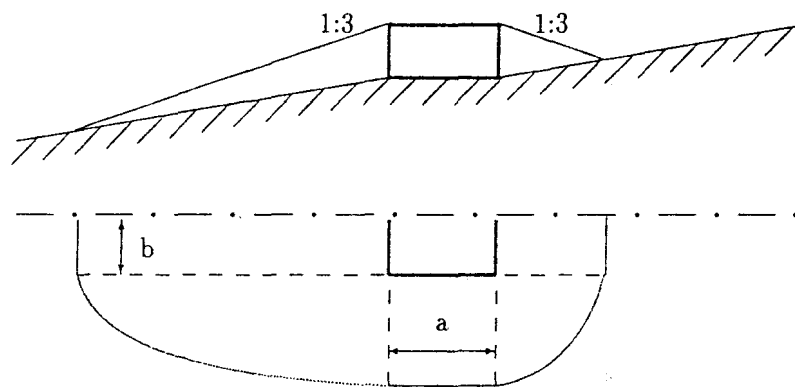


**Сл. 2.31. Атрактивна (изложена) површина за зграда со истакнат дел**



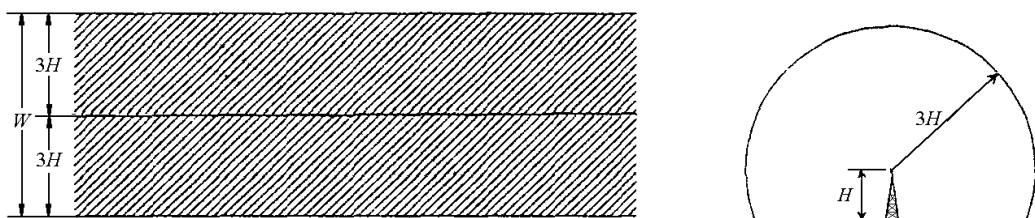
**Сл. 2.32. Атрактивна (изложена) површина за долга зграда со истакнат дел**





Сл. 2.33. Атрактивна (изложена) површина на објект поставен на нерамен терен

## 2.6.2. Удари на гром во надземните водови



Сл. 2.34. Атрактивна површина изложена на атмосферски празнења кај надземен вод

За проценка на бројот на испади на надземните водови поради на директни атмосферски празнења е потребно, меѓу другото, да се знае *просечниот годишен број* на директни удари на громот во надземниот вод  $N_L$ . Во случајот кога надземниот вод минува низ релативно рамен терен овој број може да се определи со помош на релацијата:

$$N_L = N_g \cdot L \cdot W \quad (2.20)$$

каде што се:

$N_g$  – густина на празнења облак - земја (удари/km<sup>2</sup>, год);

$L$  – должина на водот (km);

$W$  – широчина на појасот над земјата од кој водот ги прима врз себе ударите на молња (km).

Се смета дека широчината на појасот  $W$  на привлечното дејство на надземниот вод е пропорционална на височината на столбовите од надземниот вод  $H$ , според релацијата (2.21) и сликата 2.34.

$$W = 2 \cdot 3 \cdot H = 6 \cdot H, \quad (2.21)$$

Истражувањата вршени во поново време покажуваат дека врската помеѓу височина на водот и широчината на појасот атрактивна површина не е линеарна и го има обликот прикажан со релацијата (2.22). Таа се однесува на општиот случај кога водот има две заштитни јажиња поставени во хоризонтална рамнина на меѓусебно растојание  $b$ :

$$W = b + 28 \cdot h_{sr.zj}^{0.6}, \quad (2.22)$$

Во неа со  $h_{sr.zj}$  е означена просечна височина (m) на заштитното јаже/јажиња, водејќи сметка и за провесот, а  $b$  е растојание помеѓу заштитните (земјоводните) јажиња (m). Притоа за водови со едно заштитно јаже се зема дека е  $b = 0$ .

Бројот на директни удари на гром во надземниот вод обично се изразуваат во димензија удари на должина километар, годишно (удари/km, годишно) или пак во димензија (удари/100 km, годишно). Во последниот случај овој број ќе изнесува:

$$n_{100km, god.} = 0,1 \cdot N_g \cdot (b + 28 \cdot h_{sr.zj}^{0,6}) \quad (2.23)$$

**Пример 2.2.** Да се пресмета специфичниот број на удари  $n_{100km, god.}$  и вкупниот годишен број на удари  $n$  на громот во надземен вод со две заштини јажиња за кој што се познати следните податоци: керауничко ниво  $T_d = 40$  дена; должина на водот  $L = 120$  km; просечна височина на фазните спроводници во точките на обесување  $h_{pr} = 20$  m; просечна височина на столбовите  $H = 28$  m; просечна височина на заштитните јажиња во точките на обесување  $h_{zj} = H = 28$  m; провес на заштитното јаже  $f_{zj} = 12$  m; растојание помеѓу заштитните јажиња  $b = 16$  m.

### *Решение:*

Според рел. (2.17) густината на атмосферските празнења на површината од земјата ќе биде:

$$N_g = 0,04 \cdot T_d^{1,25} = 0,04 \cdot 40^{1,25} = 4,024 \text{ удари/km}^2, \text{ годишно.}$$

Средната височина на заштитното јаже  $h_{sr.zj}$  ќе се добие кога од височината на обесување  $h_{zj}$  се одбијат  $2/3$  од провесот на јажето  $f_{zj}$ , т.е.:

$$h_{sr.zj} = h_{zj} - 2/3 \cdot f_{zj} = 28 - (2/3) \cdot 12 = 20 \text{ m.}$$

Понатаму имаме:

$$b + 28 \cdot h_{sr.zj}^{0,6} = 16 + 28 \cdot 20^{0,6} = 184,96 \text{ m}$$

$$\begin{aligned} n_{100km, god.} &= 0,1 \cdot N_g \cdot (b + 28 \cdot h_{sr.zj}^{0,6}) = \\ &= 0,1 \cdot 4,024 \cdot 184,96 = 74,42 \text{ удари/100 km, год.} \end{aligned}$$

Вкупниот просечен годишен број на удари на далноводот  $N_L$ , според тоа, ќе биде:

$$N_L = n_{100km, god.} \cdot \frac{L}{100} = 89,31 \text{ удари/годишно.}$$

Доколку ширината  $W$  на појасот привлечно дејство го пресметавме според (2.21), ќе се добиеше:

$$W = 6 \cdot H = 6 \cdot 28 = 168 \text{ m} = 0,168 \text{ km};$$

$$N_L = N_g \cdot L \cdot W = 4,024 \cdot 120 \cdot 0,168 = 81,12 \text{ удари/год.}$$

■ ■ ■

## 2.7. ИЗБОР НА НИВО НА ЗАШТИТА НА НАДЗЕМНИТЕ ОБЈЕКТИ ОД АТМОСФЕРСКИ ПРАЗНЕЊА

### 2.7.1. Општо

Пред да се пристапи кон изборот на типот и карактеристиките на системот за заштита од атмосферските празнења потребно е се утврди потребата од таква заштита и доколку таква потреба постои, да се направи соодветен избор на нивото на заштита на објектите од атмосферските празнења. Тој избор, во основа, треба да биде базиран на видот и големината на штетите што ќе бидат предизвикани од директното атмосферско празнење како и зачестеноста (веројатност за појава) на директните удари на гром во објектот.

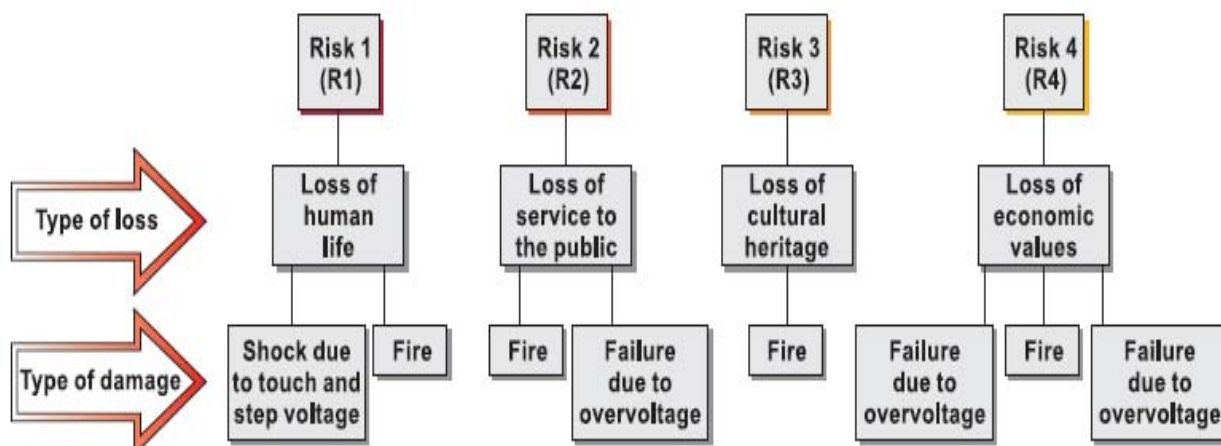
Во многу ситуации потребата од заштита е евидентна и недискутабилна. Такви се, на пример, објектите каде што престојуваат многу луѓе во голем дел од денот (училишта, болници, кина, театри и сл.), објектите каде што се даваат јавни услуги (јавни установи, административни центри, спортски објекти итн.), високи и истакнати објекти кои што се прилично изложени на директни удари на громот, згради и објекти во кои што се чуваат експлозивни и запаливи материјали, згради во кои се чува незаменливо културно наследство и др.

Во основа пристапот кон оценката на потребата и самиот избор на нивото на заштита на објектот од удари на гром е шематски опишано на дијаграмот прикажан на сликата 2.35.

Во табелата 2.9 се дадени некои типични последици од директните удари во некои обични објекти.

Табела 2.9. Последици од атмосферско празнење во обични објекти

<i>Тип на објектот</i>	<i>Можни последици од атмосферското празнење</i>
Приватни куќи	Оштетување на ел. инсталација, пожар, штета на покуќнината. Штетата е обично ограничена само на уредите и објектите блиску до местото на ударот или се наоѓаат на патеката на течењето на струјата на громот.
Фарма	Можност за појава на пожар и опасни прескоци. Можност за испад на напојувањето со електрична енергија што ќе предизвика прекин на вентилацијата, дотурот на храна и губиток на добиток.
Театар, училиште, спортски терен	Создавање паника кај посетителите, испад на противпожарните аларми и можност за задоцнето активирање на противпожарните мерки.
Банки, осигурителни и комерцијални компании	Истите проблеми како во претходниот случај. Покрај тоа се можни и веројатни проблеми во работата поради губење на комуникацијата, испад на компјутерскиот систем и загуба на податоци.
Болница, хотел, студентски дом, затвор	Истите проблеми како во претходниот случај плус проблеми со луѓето на интензивна нега и тешкотии при спасувањето на луѓе што се наоѓаат на интензивна нега.
Индустриски објект	Прекин на производството, штети чија големина зависи од видот на материјалите со кои се работи. Штетите можат да бидат мали но и неприфатливо високи.
Музеи и археолошки наоѓалишта	Загуби на непроценливо и незаменливо културно и национално наследство.



**Слика 2.35. Категоризација и систематизиран приказ на типовите загуби и штети при директните атмосферски празнења во штитените објекти**

Изборот на нивото на заштита на штитениот објект и изборот на параметрите на надворешната громобранска инсталација, според вообичаените постапки што се применуваат во денешно време, базираат на споредувањето на два параметра:

- очекуваниот број на директни удари на гром во објектот  $N_d$ , за кој што веќе се зборува во претходниот дел и
- на прифатливиот годишен број на удари  $N_c$ .

Бројот  $N_c$ , пак, зависи од типот на штитениот објект како и од карактерот и големината на штетите што би се предизвикале кај него при директните атмосферски празнења. Начинот на неговото пресметување и прифатливото ниво на овој број (ризик) се најчесто нормирани со националните стандарди на секоја земја. Понекогаш, во специјални и посебни услови, кога преовладува некој специфичен критериум, можно е изборот на заштитата да биде базирана на некоја друга претпоставка или потреба. Во тој случај е можно да се применат други мерки за заштита кои што се поригорозни од оние кои би биле резултат на примената на овде опишаната општа постапка за избор на нивото на заштита на објектот.

### 2.7.2. Пресметка на прифатливиот годишен број на удари $N_c$

Според постапката што се предлага од ИЕС и која што е општо прифатена од најголем број земји во светот, нивото на сигурност од директните атмосферските удари во објектот, т.е. вредноста на прифатливиот број  $N_c$ , се пресметува така што се води сметка за:

- типот на штитениот објект;
- содржината на објектот;
- присуството на луѓе во објектот и
- последиците (технички и економски) од атмосферското празнење.

И покрај тоа што секоја земја си има свој критериум за определување на нивото на сигурност на еден објект од директни атмосферски празнења, т.е. прифатливиот годишен број  $N_c$ , овде ќе биде изложена постапката која што е предложена од ИЕС и која, како таква, е вградена во националните стандарди на повеќето земји.

Вредноста на прифатливиот број  $N_c$  се пресметува со помош на релацијата (2.24):

$$N_c = \frac{5,5 \cdot 10^{-3}}{C} \left( \frac{\text{удари}}{\text{годишно}} \right); \quad C = C_1 \cdot C_2 \cdot C_3 \cdot C_4. \quad (2.24)$$

Коефициентите  $C_1 \dots C_4$ , зависат од преходно наброените фактори (тип, односно конструкција на штитениот објект, содржина на објектот, присуството на луѓе во објектот и последици од ударот на громот) и се определуваат со помош на табелите 2.10 . . . 2.13.

**Табела 2.10. Зависност на коефициентот  $C_1$  од конструкцијата на објектот**

Конструкција	Метален покрив	Покрив од обичен материјал	Запаллив покрив
Метал	0,5	1,0	2,0
Вообичаен материјал	1,0	1,0	2,5
Запаллив материјал	2,0	2,5	3,0

**Табела 2.11. Зависност на коефициентот  $C_2$  од содржината на објектот**

Содржина без вредност и незапалива	0,5
Содржина со стандардна вредност и нормална запаливост	1,0
Содржина со висока вредност или особена запаливост	2,0
Содржина со особена вредност, ненадоместливи штети, содржина мошне лесно запалива или експозивна	3,0

**Табела 2.12. Зависност на коефициентот  $C_3$  од присуството на луѓе во објектот**

Во објектот нема присуство на луѓе	0,5
Нормално присуство на луѓе	1,0
Присуство на луѓе. Ризик од паника и тешка евакуација	3,0

**Табела 2.13. Зависност на коефициентот  $C_4$  од последиците од ударот на громот**

Не се бара континуитет на услугите. Нема последици по околината	1,0
Се бара континуитет на услугите. Нема последици по околината	5,0
Има последици по околината	10,0

### ***Постапка за изборот на нивото на заштита на СЗАП***

Постапката со која што се утврдува дали воопшто постои потреба од заштита на некој објект од директни атмосферски празнења и со која потоа се врши изборот на нивото на заштита на системот за заштита од атмосферски празнења (СЗАП) што треба да се примени се состои од процедура која што сликовито е опишана со блок-дијаграмот прикажан на сликата 2.35. Во основа на оваа процедура, најнапред се врши споредба на вистинскиот годишен број  $N_d$  и прифатливиот годишен број  $N_c$  на директни удари на гром во објектот. Доколку е  $N_d < N_c$  се констатира дека потреба од заштита на објектот од директни удари на гром нема и целата процедура на проверката завршува.

Во спротивниот случај, кога е  $N_d > N_c$ , произлегува заклучокот дека систем на заштита на објектот од атмосферски празнења е неопходен. Во тој случај најнапред се врши

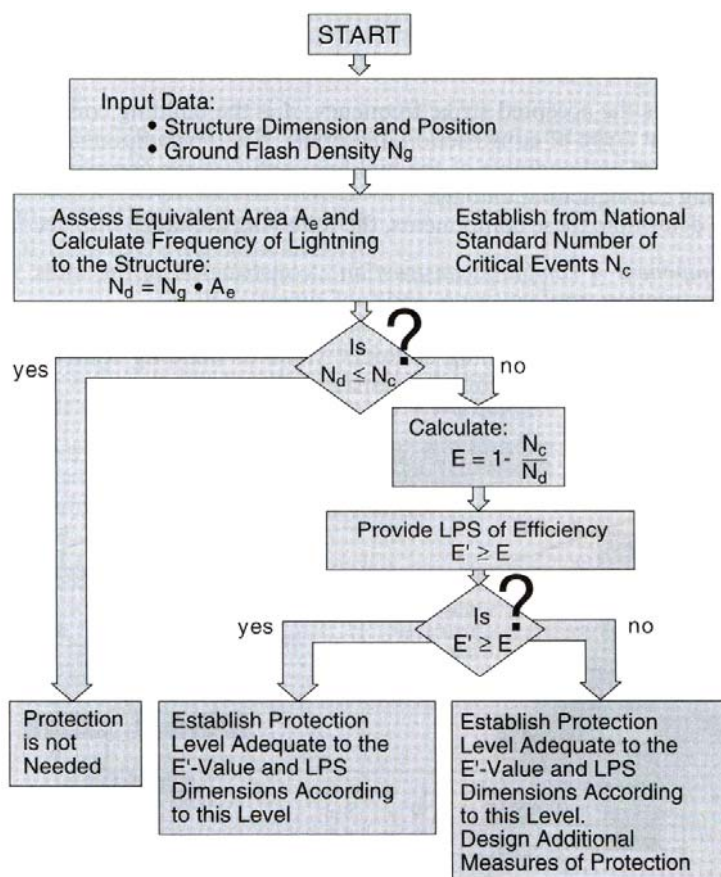
пресметка на величината  $E$  наречена *фактор на ефикасност* на заштитата на објектот кој што се дефинира со помош на релацијата (2.25). Овој показател ни кажува колкава треба да биде ефикасноста на СЗАП што ќе биде применет за да се добие прифатливо ниво на сигурност на објектот од директните удари на гром.

$$E = 1 - \frac{N_c}{N_d} \quad (2.25)$$

*Факторот на ефикасност  $E$*  има вредност помала од 1, т.е.  $0 < E \leq 1$ . Колку е неговата вредност повисока, толку е загрозеноста на објектот поголема и ќе биде потребно ефикасноста на СЗАП што се планира да се примени да биде повисока, со што би се постигнало поголем процент од ударите на гром да бидат преземни од страна на СЗАП.

По пресметката на параметарот  $E$  се усвојува *ниво на заштита (заштитно ниво)* што треба да се постигне со СЗАП. Изборот се врши во согласност со пресметаната вредност на факторот на ефикасност  $E$  и табелата 2.14. Вредноста на нивото на заштита се избира во зависност од типовите штети и загуби, според блок–дијаграмот од сликата 2.36. Според ИЕС стандардите нормирани се 5 нивоа на заштита, прикажани во табелата 2.14. во која се прикажани и вредностите на амплитудата на струјата на громот  $I_m$  за која што се определува ударното растојание  $R_s$ , што соодветствува на таа струја и на бараното ниво на заштита, пресметано според (2.26).

$$R_s = 10 \cdot I_m^{0,67} \text{ (m)}; \quad I_m \text{ (kA)}. \quad (2.26)$$



Слика 2.36. Постапка за избор на СЗАП и ниво на заштита

Вообичаено се усвојува едно од петте нивоа на заштита наведени во табелата 2.14. Со тоа е дефинирана ефикасноста на заштитата од ударите на гром што треба да се очекува да биде постигната од применетиот надворешен СЗАП.

Потоа се избира надворешен систем на заштита од директни удари на гром, во согласност со усвоената проектанска практика, искуство и традиција и повторно се пресметува новата вредност на бројот  $N'_d$  што се постигнува со предвидениот систем на громобранска заштита (СЗАП). Новата вредност на директните удари на гром во објектот, се разбира, ќе биде помала од преходната, т.е.  $N'_d < N_d$ . Во исто време бројот  $N'_d$  треба да биде помал и од прифатливиот број на удари  $N_c$ , т.е.  $N'_d < N_c$ .

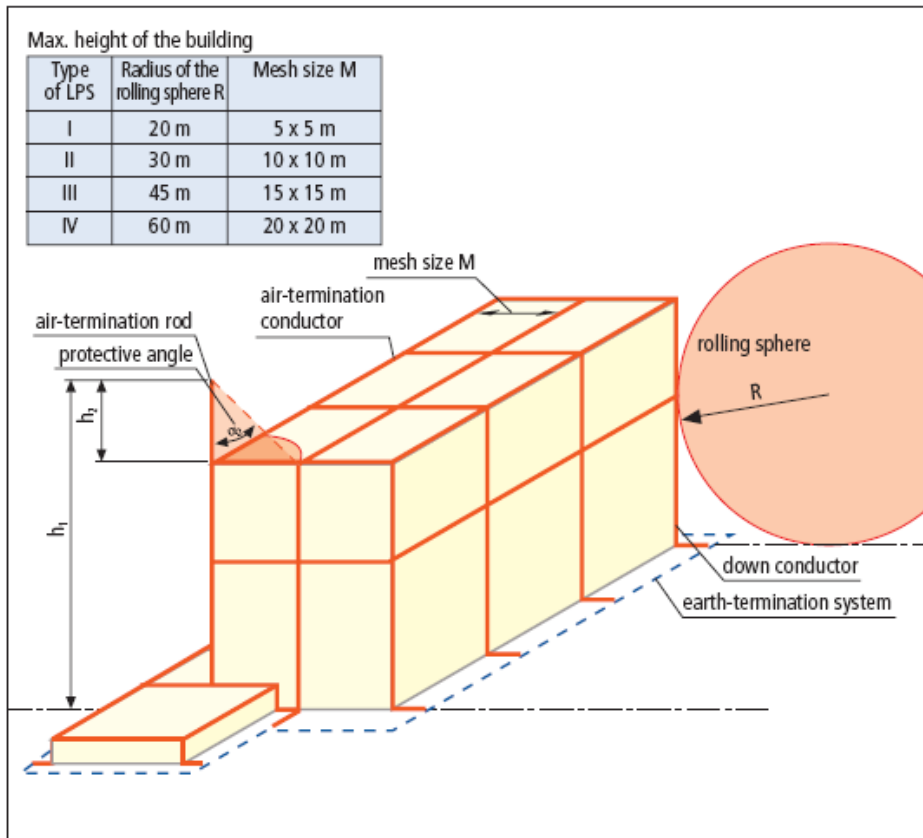
**Табела 2.14. Нормирани нивоа на заштита од директни атмосферски празнења**

Фактор на ефикасност $E$ , пресметан со (2.25)	Ниво на заштита што треба да го обезбеди предвидениот СЗАП	Min. струја на громот $I_m$ (kA)	Ударно растојание $D_s$ (m)
1/1	1/2	1/3	1/4
$E > 0,98$	I ниво + дополнит. заштитни мерки	/	/
$0,95 < E \leq 0,98$	I ниво	2,8	20
$0,90 < E \leq 0,95$	II ниво	5,4	30
$0,80 < E \leq 0,90$	III ниво	9,5	45
$0 < E \leq 0,80$	IV ниво	14,7	60

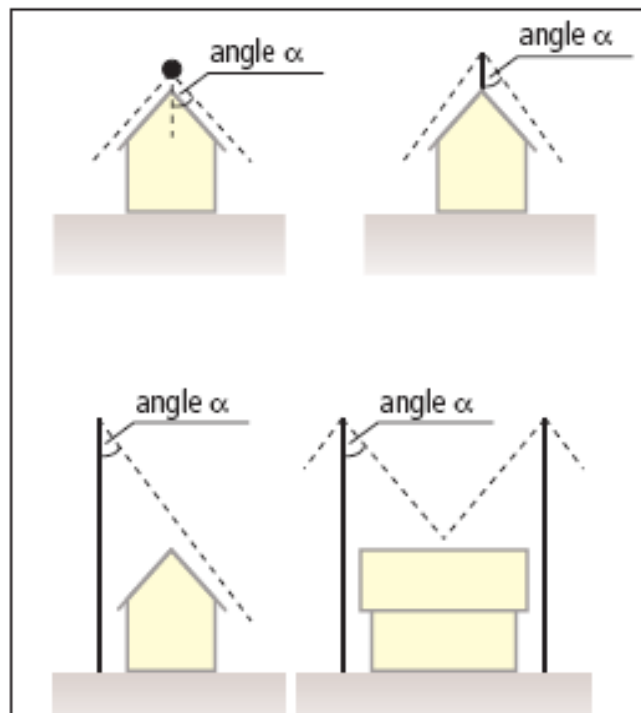
Типични дополнителни мерки на заштита се следните:

- преземање зафати за намалување на напоните на допир и чекор;
- преземање мерки со кои се спречува ширење на пожар;
- зафати со кои се смалуваат ефектите од индуцираните пренапони предизвикани од атмосферските празнења врз чувствителната опрема во објектот.

Постапката за избор на надворешен СЗАП и пресметката на неговото ниво на заштита  $E'$ , т.е. проверката на неговата ефикасност, во практиката се вршат на едноставен начин со користење готови дијаграми и табели кои што се среќаваат во разни книги и прирачници. Од нив се отчитува, на пример, колкав треба да биде заштитниот агол  $\alpha$  во случај на заштита со помош на стапест громобран доколку се сака да се постигне бараното ниво на заштита (слика 2.38 ÷ 2.42). Друг таков пример е определувањето на густината на окцата кај надворешните СЗАП со кои се штитат зградите и другите објекти по принципот на громобран во форма на фарадеев кафез (слика 2.37).

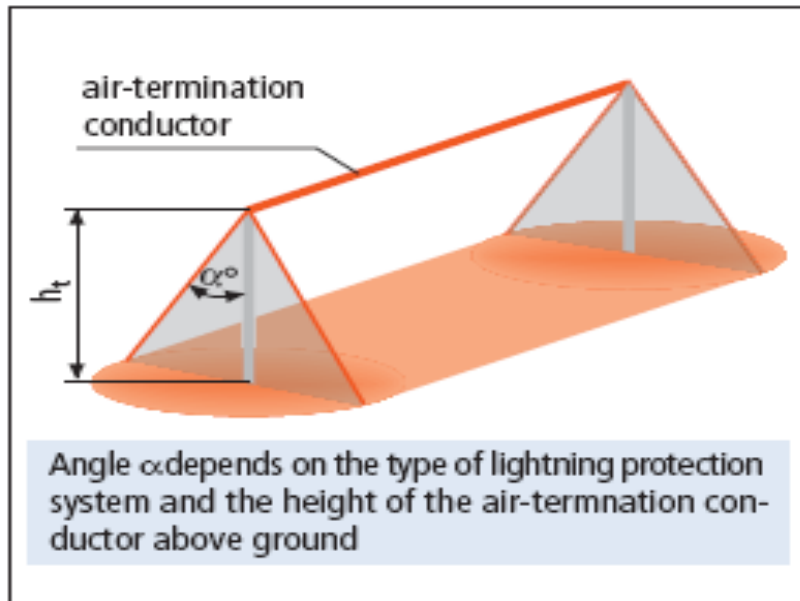


Слика 2.37. Постапка за избор на заштитниот агол  $\alpha$  на стапестиот громобран и избор на димензиите  $M$  на окцата кај СЗАП на зграда, според DIN и VDE.

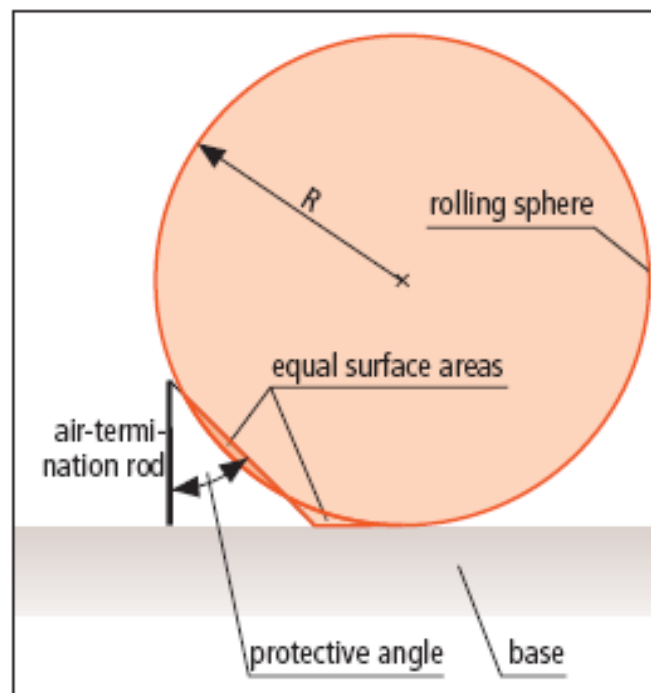


Слика 2.38. Постапка за избор на заштитниот агол  $\alpha$  на стапест громобран

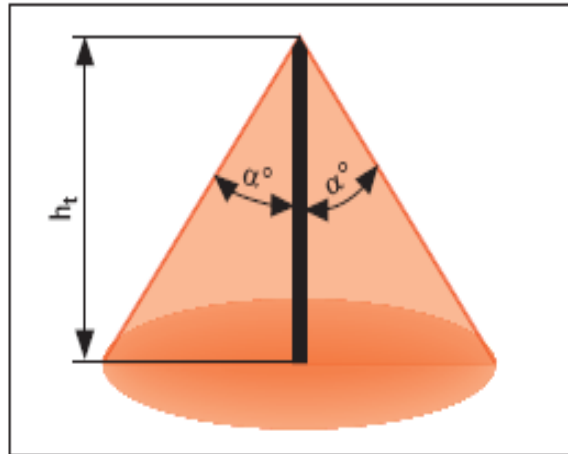




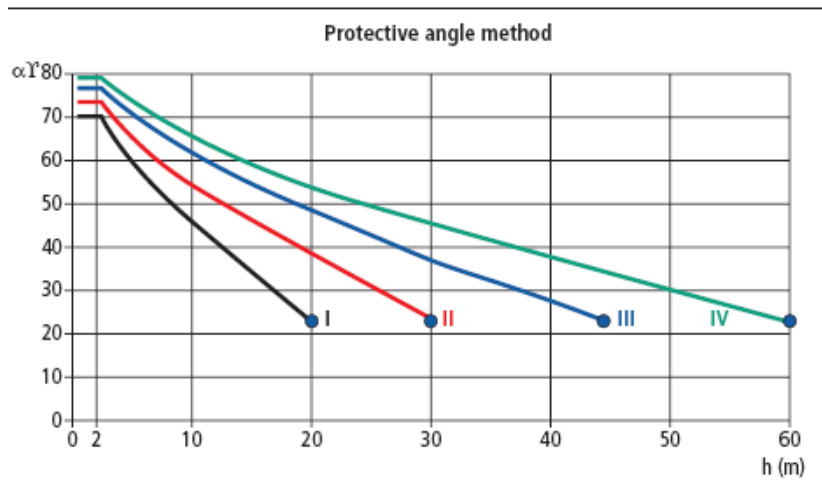
Слика 2.39. Приказ на зоната заштитена со хоризонтален спроводник / јаже



Слика 2.40. Дефиниција на заштитен агол  $\alpha$  на громобран според методот на фиктивна сфера



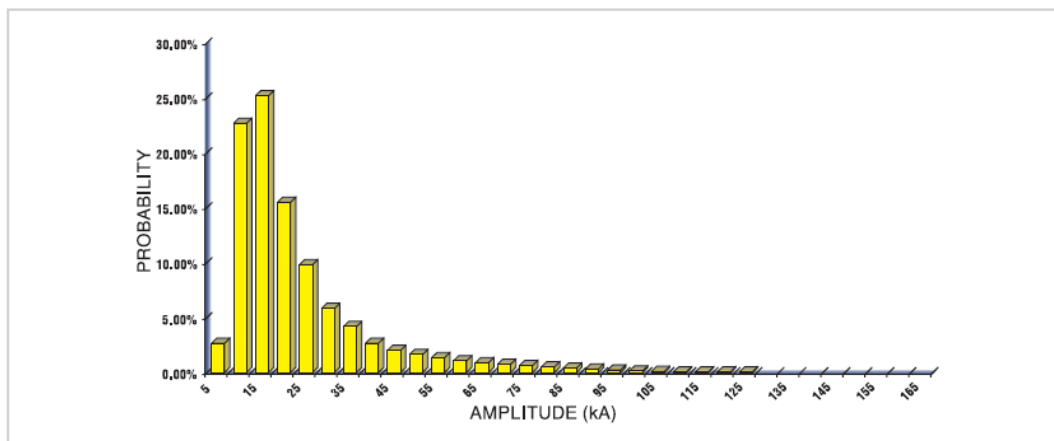
Слика 2.41. Приказ на зоната заштитена со вертикален стапест громобран



Слика 2.42. Зависност на заштитниот агол  $\alpha$  од височината  $h$  на стапестиот громобран и од потребното ниво на заштита

#### Expected atmospheric discharge magnitudes

Maximum atmospheric discharge magnitudes occur from a few 10 kA to 200 kA. See graph 1 which depicts statistical data on intensity amplitude at discharging.

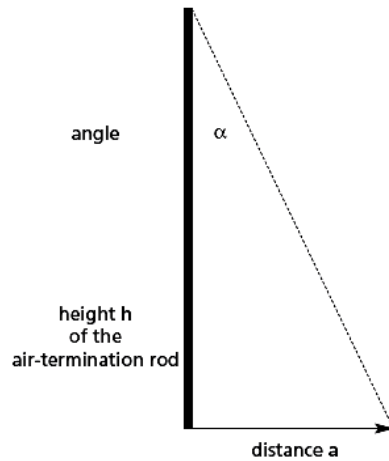


Probability histogram of atmospheric discharge magnitudes

Comment: the greatest certainty is that the amplitudes of atmospheric discharges are in the range between 10 - 35 kA.

Табела 2.15. Зависност на заштитниот агол  $\alpha$  од височина  $h$  на стапестиот громобран и степенот на заштита од директни атмосферски празнења

Height of the air-termination rod $h$ in m	Type of LPS I		Type of LPS II		Type of LPS III		Type of LPS IV	
	Angle $\alpha$	Distance $a$ in m	Angle $\alpha$	Distance $a$ in m	Angle $\alpha$	Distance $a$ in m	Angle $\alpha$	Distance $a$ in m
1	67	2.36	71	2.90	74	3.49	78	4.70
2	67	4.71	71	5.81	74	6.97	78	9.41
3	67	7.07	71	8.71	74	10.46	78	14.11
4	65	6.43	69	10.42	72	12.31	76	16.04
5	59	6.66	65	10.72	70	13.74	73	16.35
6	57	7.70	62	11.28	68	14.85	71	17.43
7	54	8.26	60	12.12	66	15.72	69	18.24
8	52	8.96	58	12.80	64	16.40	68	19.80
9	49	9.20	56	13.34	62	16.93	66	20.21
10	47	9.65	54	13.76	61	18.04	65	21.45
11	45	10.00	52	14.08	59	18.31	64	22.55
12	42	9.90	50	14.30	58	19.20	62	22.57
13	40	10.07	49	14.95	57	20.02	61	23.45
14	37	9.80	47	15.01	55	19.99	60	24.25
15	35	9.80	45	15.00	54	20.65	59	24.96
16	33	9.74	44	15.45	53	21.23	58	25.61
17	30	9.24	42	15.31	52	21.76	57	26.18
18	28	9.04	40	15.10	50	21.45	56	26.69
19	25	8.39	39	15.39	49	21.86	55	27.13
20	23	8.07	37	15.07	48	22.21	54	27.53
21			36	15.26	47	22.52	53	27.87
22			35	15.40	46	22.78	52	28.16
23			33	14.94	45	23.00	51	28.40
24			32	15.00	44	23.18	50	28.60
25			30	14.43	43	23.31	49	28.76
26			29	14.41	42	23.41	49	29.91
27			27	13.76	40	22.66	48	29.99
28			26	13.66	39	22.67	47	30.03
29			25	13.52	38	22.66	46	30.03
30			23	12.73	37	22.61	45	30.00
31					36	22.52	44	29.94
32					35	22.41	44	30.90
33					35	23.11	43	30.77
34					34	22.93	42	30.61
35					33	22.73	41	30.43
36					32	22.50	40	30.21
37					31	22.23	40	31.05
38					30	21.94	39	30.77
39					29	21.62	38	30.47
40					28	21.27	37	30.14
41					27	20.89	37	30.90
42					26	20.48	36	30.51
43					25	20.05	35	30.11
44					24	19.59	35	30.81
45					23	19.10	34	30.35
46							33	29.87
47							32	29.37
48							32	29.99
49							31	29.44
50							30	28.87
51							30	29.44
52							29	28.82
53							28	28.18
54							27	27.51
55							27	28.02
56							26	27.31
57							25	26.58
58							25	27.05
59							24	26.27
60							23	25.47



**Пример 2.3.** Облакодер со димензии должина  $L = 20$  m, широчина  $W = 20$  m и височина  $H = 60$  m, е осамен на рамно тло. Керауничкото ниво во областа во којашто се наоѓа објектот изнесува  $T_d = 40$  дена ( $N_g = 4,02$  удари/ $\text{km}^2$ , год.). Да се пресмета атрактивната површина на објектот  $A_e$  како и вкупниот годишен број на удари  $N_d$  на громот во него. Дали е потребна надворешна громобранска заштита за овој објект.

**Решение:**

Според релацијата (2.18) атрактивната површина на објектот ќе биде:

$$A_e = L \cdot W + 6H \cdot (L + W) + 9\pi H^2 = 116.588 \text{ m}^2 = 0,116588 \text{ km}^2.$$

Вкупниот просечен годишен број удари во објектот, во согласност со (2.19), ќе изнесува:

$$N_d = N_g \cdot A_e \cdot C_d = 4,02 \cdot 0,116588 \cdot 1 = 0,469 \text{ удари/год.}$$

( $C_d = 1$  согласно табела 2.18).

Прифатливиот годишен број на удари во облакодерот  $N_c$ , согласно изложеното во точката 2.7.2 ќе биде:

$$N_c = \frac{5,5 \cdot 10^{-3}}{C} \left( \frac{\text{удари}}{\text{годишно}} \right);$$

$$C = C_1 \cdot C_2 \cdot C_3 \cdot C_4 = 1 \cdot 1 \cdot 3 \cdot 1 = 3;$$

$$N_c = \frac{5,5 \cdot 10^{-3}}{3} = 1,83 \cdot 10^{-3} \frac{\text{удари}}{\text{год.}}$$

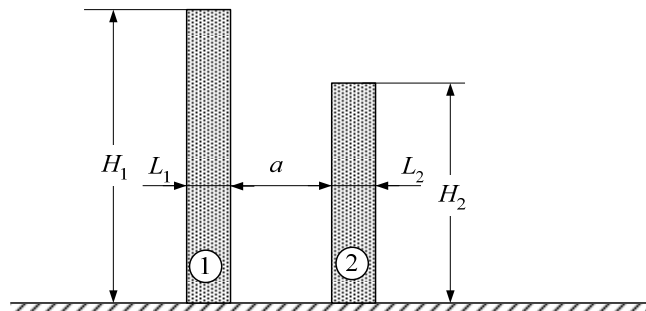
Бидејќи е вкупниот број на удари  $N_d$  далеку поголем од прифатливиот број  $N_c$ , ќе биде потребно да се предвиди надворешна громобранска инсталација. Факторот на ефикасност  $E$  на усвоениот СЗАП треба да биде:

$$E = 1 - \frac{N_c}{N_d} = 1 - \frac{1,83 \cdot 10^{-3}}{0,469} = 0,996.$$

Според табелата 2.14 потребно е да се предвиди примена на СЗАП којшто ќе обезбеди највисоко, I заштитно ниво + дополнителни мерки.

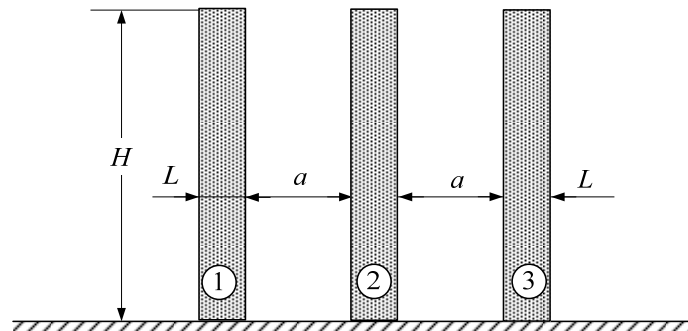


**Задача 2.4.** Два облакодера со димензии  $L_1 = 20$  m,  $W_1 = 20$  m и  $H_1 = 60$  m и  $L_2 = 20$  m,  $W_2 = 20$  m и  $H_2 = 36$  m, се сместени еден покрај друг, на растојание  $a = 40$  m, на рамно тло (слика 3.2.4.1). Керауничкото ниво во областа во којашто се наоѓа објектот изнесува  $T_d = 40$  дена ( $N_g = 4,02$  удари / $\text{km}^2$ , год.). Да се пресмета атрактивната површина на обата објекта  $A_{e1}$  и  $A_{e2}$  како и вкупниот годишен број на удари  $N_{d1}$  и  $N_{d2}$  на громот во нив. Дали е потребна надворешна громобранска заштита за вториот објект. Задачата да се реши и за случајот кога височината на вториот облакодер изнесува  $H_2 = 50$  m.



Слика 3. 2.4.1

**Задача 2.5.** Три облакодери со еднакви димензии  $L = 20$  m,  $W = 20$  m и  $H = 60$  m, се поставени во права линија, еден покрај друг, на заемни растојанија  $a = 20$  m, како на сликата 3.2.5 и се наоѓаат во населено место во кое доминира нискоградба. Керауничкото ниво во областа во којашто се наоѓа објектот изнесува  $T_d = 30$  дена ( $N_g = 2,81$  удари/ $\text{km}^2$ , год.). Да се пресмета атрактивната површина на средниот објект  $A_{e2}$  како и вкупниот годишен број на удари  $N_{d2}$  на громот во него. Дали е потребна надворешна громобранска заштита за овој објект и кое заштитно ниво треба да се предвиди за таа цел.



Слика 3. 2.5.1

**Решение:**

■ ■ ■

### 3. ЗАШТИТА ОД ДИРЕКТНИ УДАРИ НА ГРОМ

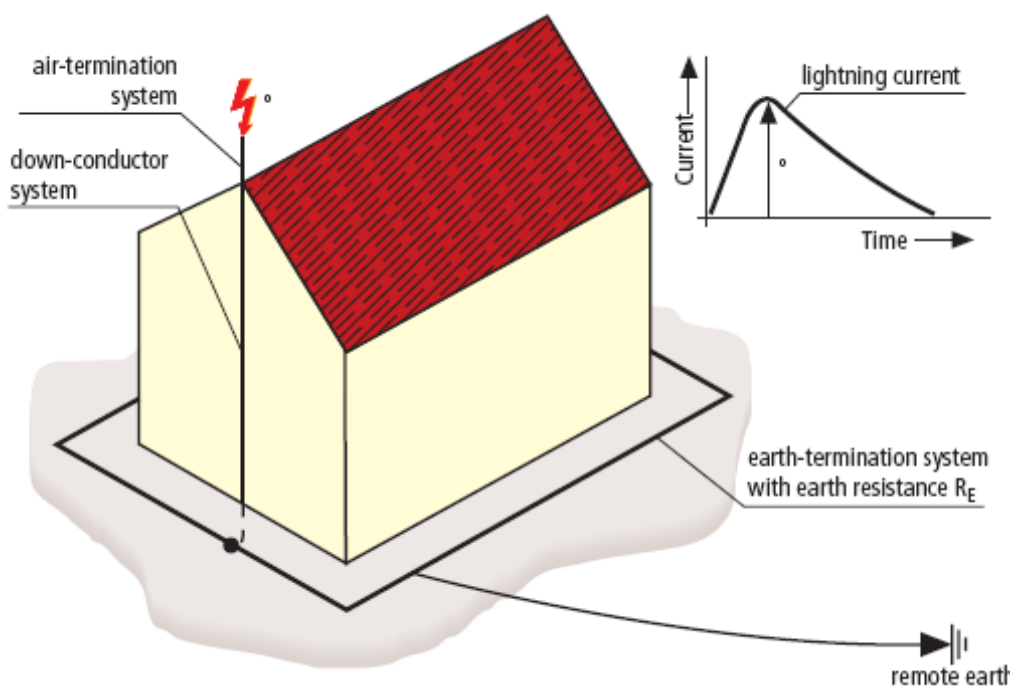
#### 3.1. ВОВЕД

Во овој дел од учебников ќе се зборува за заштитата на објектите на земјата од директни удари на гром со помош на надворешна громобранска инсталација. Многу често *надворешна громобранска инсталација* се нарекува уште и скратено "громобран".

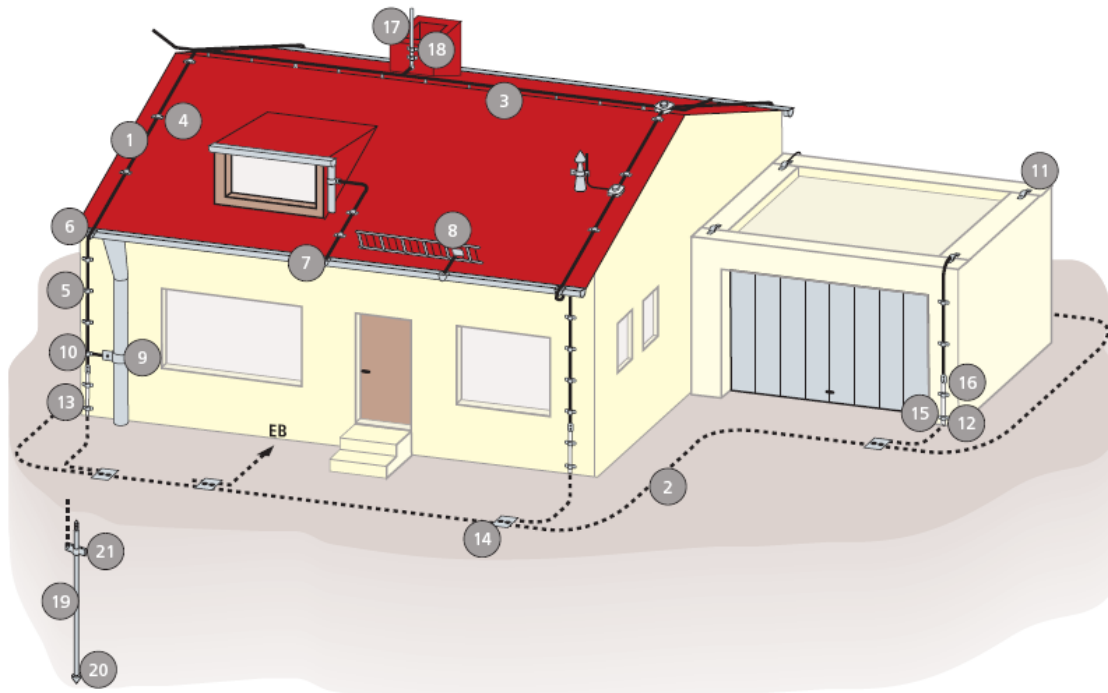
Громобраните како средство за заштита од директни удари на гром се применувале одамна, меѓутоа помасовно станале прифатени по истражувањата што ги направил Бенџамин Франклин кон крајот на XVIII век.

Громобранот е наменет да прими на себе добар дел од ударите на гром во граници на областа која ја штити и да ја одведе во земјата струјата на громот. Тој се состои од *приемник* или *фаќалка на громот* (означен на сликата 3.1. со терминот air-termination system), кој го надвисува штитениот објект, *заземјувач* (означен на сликата 3.1. со терминот earth-termination system) и *одвод* на струјата на громот, (означен на сликата 3.1 со терминот down-conductor system) кој го поврзува приемникот со заземјувачот. Овие три делови од надворешната громобранска инсталација во литературата се среќаваат и под називите:

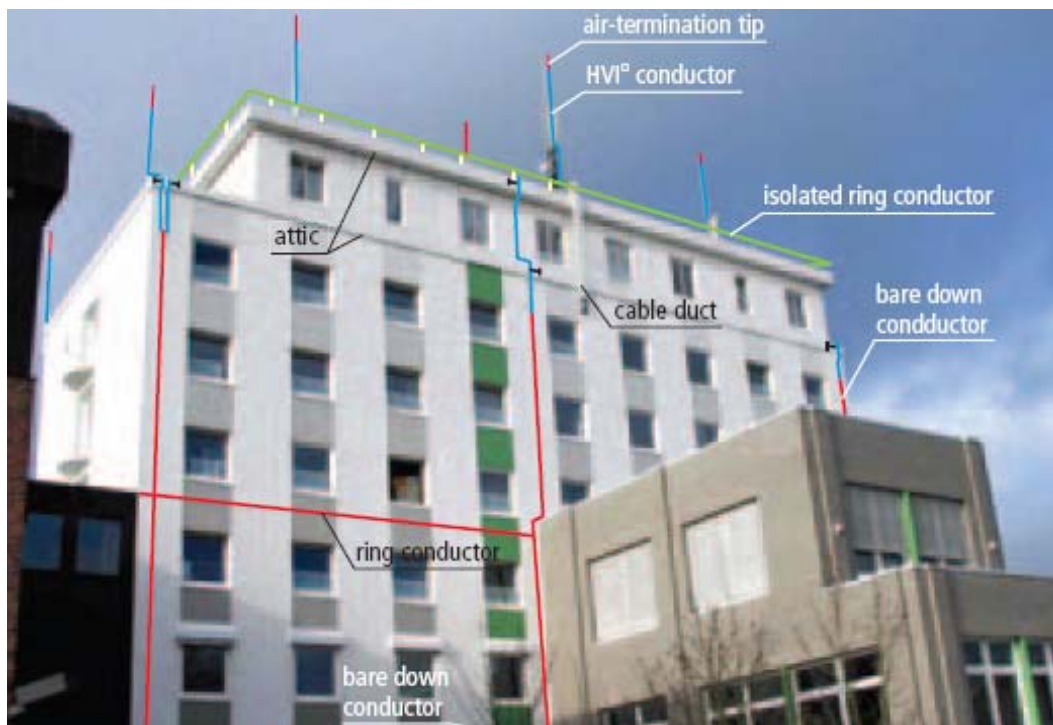
- 1) прифатен систем;
- 2) земјоводни или спуствни спроводници и
- 3) систем за заземјување.



Слика 3.1. Основни елементи на громобран на еден станбен објект



Слика 3.2. Приказ на надворешна громобранска инсталација на станбен објект



Слика 3.3. Изглед на комплетната надворешна громобранска инсталација на зграда

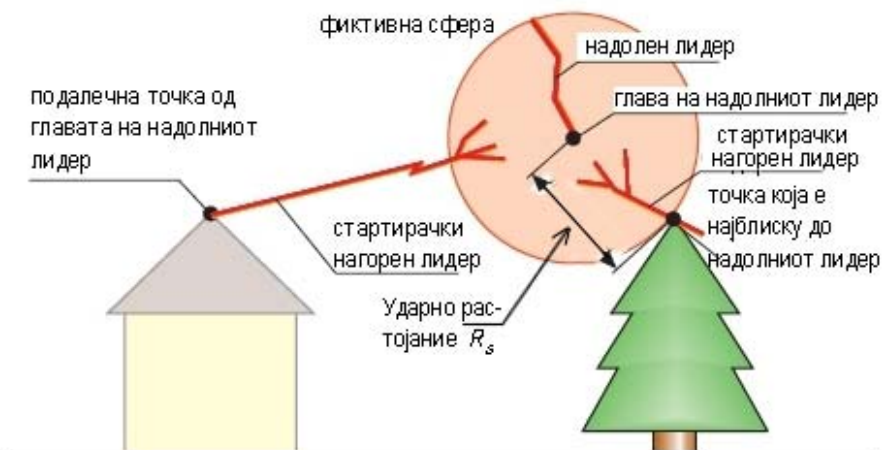
Според типот громобраните ги делиме на:

- *стапести громобрани и*
- *земјоводни (защитни) јажииња.*

Стапестите громобрани се изведуваат во вид на вертикално поставени стапови кои се поврзуваат со заземјувачот, а земјоводните јажиња се во вид на хоризонтално затегнати јажиња. Кај земјоводните јажиња улогата на одводот од громобранот ја играат самите метални столбови за кои се прицврстени земјоводните јажиња. Ако пак приемникот (стап или јаже) е поставен на изолациони носачи, како што е тоа случај кај оцаците, дрвените столбови и др., тогаш на таквите носачи треба да се постават посебни спроводници или јажиња кои што го поврзуваат приемникот со заземјувачот.

Заштитното дејство на громобраните е резултат на фактот што громот ги погодува пред сè високите објекти. Височината над површината на земјата при која лидерот на громот почнува да се ориентира во насока на највисокиот надземен објект може да се нарече *височина на ориентација* –  $h_{or}$ . Кога скоковитиот лидер ќе се спушти доволно блиску до земјата стримерите на скоковитиот лидер и нагорните стримери од громобранот се среќаваат во меѓупросторот и во тој случај може да се смета дека е височината на ориентација  $h_{or}$  е еквивалентна со поимот *ударно растојание*, за кое подетално ќе стане збор во точката 3.3. Ако главата на лидерот на височината на ориентација се наоѓа во точка која е поставена над громобранот, тогаш празнењето ќе настане врз громобранот. Со оддалечување на точката од која громот се ориентира кон громобранот се зголемува веројатноста да настане празнење врз земјата или врз објект на земјата. При доволно голема оддалеченост на точката на ориентација од громобранот празнењето во најголем број случаи ќе се одвива на земјата.

Ако во близина на громобранот се наоѓа понизок објект, доволно блиску до него, тогаш прескочниот напон на релацијата "лидер на громот – објект" ќе биде поголем од прескочниот напон на релацијата "лидер – громобран или лидер – земја". Во тој случај објектот ќе биде заштитен од директните удари на гром. Но притоа неопходен услов за сигурна заштита на објектот од атмосферските пренапони е доброто заземјување на громобранот, бидејќи при удар на гром во лошо заземјен громобран на громобранот се јавува висок потенцијал којшто може да предизвика прескок од громобранот кон штитениот објект.



Слика 3.3а. Објаснување на поимот “ударно растојание”

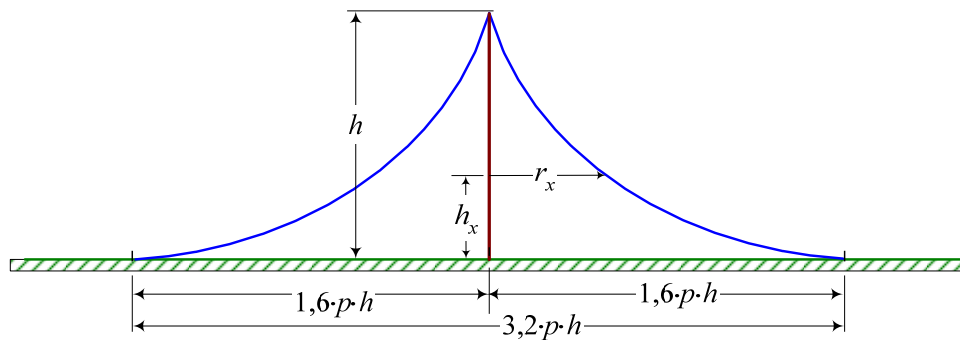
### 3.2. ЗАШТИТНИ ЗОНИ НА ГРОМОБРАНИТЕ

Под заштитна зона се подразбира определен простор околу громобранот во кој ударите на гром врз објектот кој треба да се штити ќе бидат многу малку веројатни. Бидејќи прескочните напони на долгите воздушни растојанија имаат значителна статистичка дисперзија, громобраните обезбедуваат заштита на објектот само со некој, но доволно висок, степен на доверливост (до 0,999).



Заштитните зони на громобраните обично да се определат по експериментален пат, на модели. Притоа се смета дека заштитните зони на реалните громобрани се геометриски слични со зоните добиени за лабораториски модели. Како модел на гром се користи импулсно искрово празнење, кое при долги растојанија меѓу електродите има два основни стадиума: лидерен и главен. На тој начин се постигнува квалитативна сличност со громот и во лабораториски услови.

### 3.2.1. Заштитна зона на стапест громобран



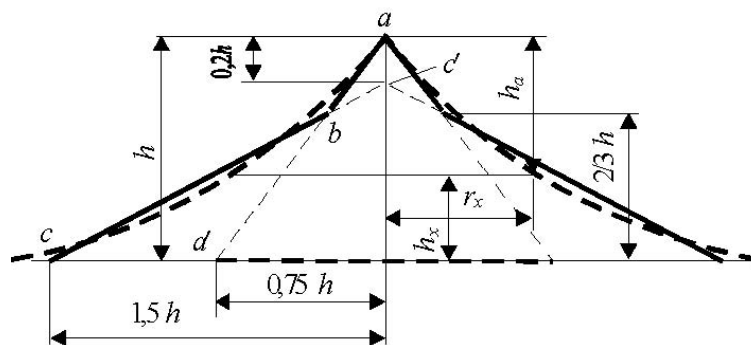
Сл.3.4.а. Заштитна зона на единичен стапест громобран

Заштитната зона на единичен стапест громобран со височина  $h$  претставува простор околу громобранот (сл. 3.4), кој што е ограничен со ротациона површина во вид на шатор чија генератриса може да се определи според следната емпириската формула:

$$r_x = p \cdot \frac{1,6 \cdot (h - h_x)}{1 + h_x/h} = p \cdot \frac{1,6 \cdot h_a}{1 + h_x/h} \quad (3.1)$$

Во (3.1) фигурира параметарот  $p$  чија вредност е  $p = 1$  за височини  $h \leq 30$  m и  $p = \sqrt{30/h}$  за  $h = 30 \div 100$  m. Останатите величини  $h$  и  $h_x$  се обележени и дефинирани на самата слика 3.4. Надвишувањето на громобранот над заштитуваниот објект се вика *активна височина* на громобранот ( $h_a = h - h_x$ ).

За определување на радиусот  $r_x$  на заштитната зона на ниво  $h_x$  во однос на земјата, место да се користи изразот (3.1) може да се примени упростена слика на заштитната зона, заменувајќи ја криволиниската генератриса со искршена линија (сл. 3.4). Во тој случај отсечката  $\overline{ab}$  претставува дел од правата која што го поврзува врвот на громобранот со точка на површината на земјата оддалечена на растојание  $0,75 \cdot ph$  од оската на громобранот, а другата отсечка,  $\overline{bc}$  претставува дел од правата која ја поврзува точката од громобранот на височина  $0,8 \cdot h$  со точката на растојание  $1,5 \cdot ph$  од громобранот на површината на земјата.



Сл.3.4.б. Апроксимирана заштитна зона на единичен стапест громобран

Генератрисите на така определената заштитна зона се опишани со следните релации:

$$r_x = \begin{cases} 1,5 \cdot p \cdot h \cdot (1 - 1,25 \cdot \frac{h_x}{h}) & \text{за } h_x \leq \frac{2}{3}h \\ 0,75 \cdot p \cdot h \cdot (1 - \frac{h_x}{h}) & \text{за } h_x > \frac{2}{3}h \end{cases} \quad (3.2)$$

### 3.2.2. Заштитна зона на два стапести громобрана

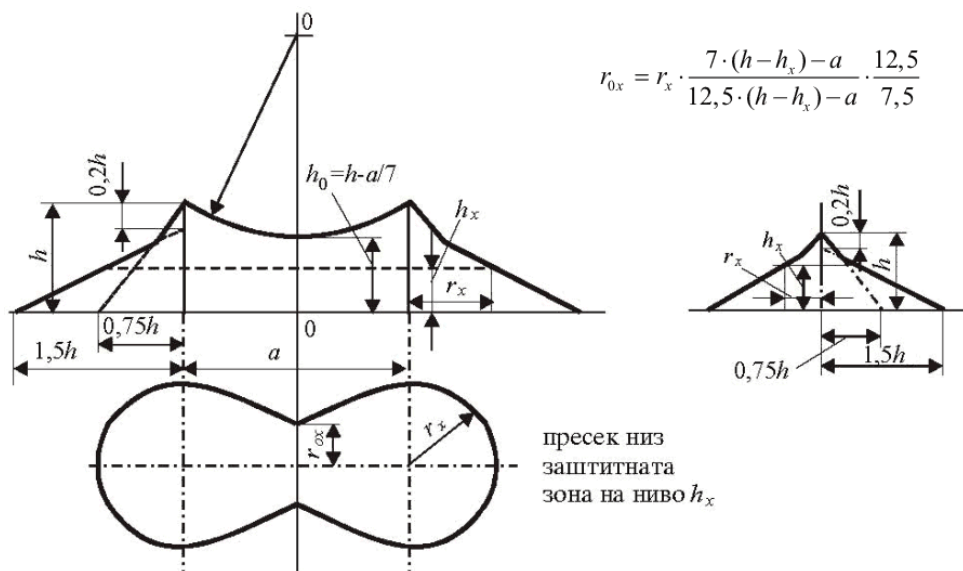
Заштитната зона на два стапести громобрана има значително поголеми димензии од збирот на заштитните зони на два единични громобрана. Експериментите покажале дека ако два громобрана се наоѓаат на меѓусебно растојание  $a \leq 7h$ , тогаш точката од површината на земјата која лежи на средината помеѓу громобраните нема да биде погодена од гром. Доколку, пак, е потребно да се заштити точка која што се наоѓа негде на средината помеѓу громобраните на височина  $h_0$ , тогаш растојанието  $a$  помеѓу громобраните треба да изнесува:

$$a < 7p \cdot (h - h_0) \quad (3.3a)$$

Од (3.3a) произлегува дека ако се познати височината  $h$  и растојанието  $a$  помеѓу двата громобрана, тогаш точката на земјата што лежи на средината помеѓу громобраните нема да биде погодена од гром доколку се наоѓа на височина  $h_0$  определена според (3.3б):

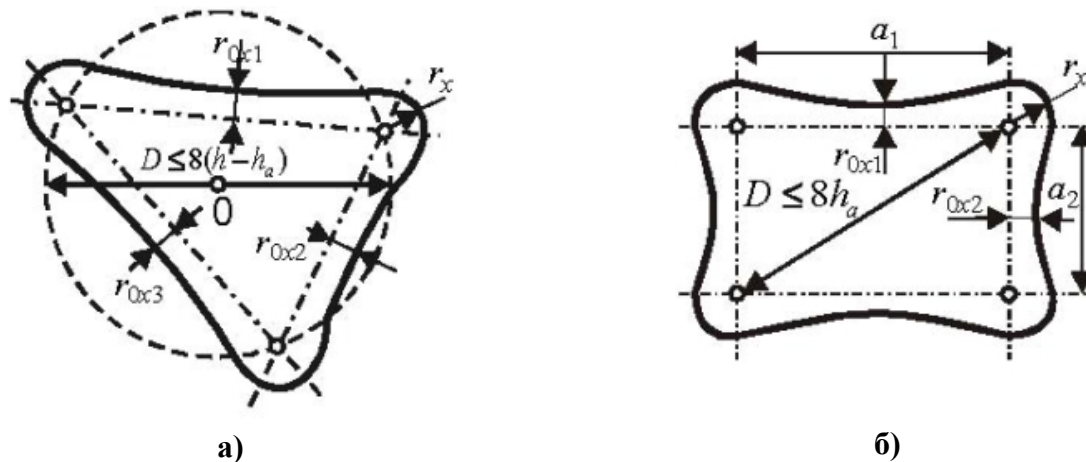
$$h_0 = h - \frac{a}{7p} \quad (3.3б)$$

Внатрешниот дел од заштитната зона на два стапести громобрана (слика 3.5) во рамнината која минува низ двата громобрана е ограничена од горната страна со дел од кругот што може да се повлече низ три точки. Две од тие точки се врвовите на двата громобрана, а третата се наоѓа на средината помеѓу громобраните, на височина  $h_0$ , определена според (3.3б). Надворешниот дел од заштитната зона, лево и десно од громобраните, се определува на ист начин како и во случајот на единичен стапест громобран. Цртањето на пресеците низ заштитната зона е прикажано на сликата 3.5.



Сл. 3.5. Определување на заштитна зона на два громобрана:  
 а) пресек низ заштитната зона на два стапести громобрана;  
 б) пресек на средината од заштитната зона

### 3.2.3. Заштитна зона на три или повеќе стапести громобрани



Сл. 3.6. Заштитна зона и услови за ефикасна заштита при:  
а) со три, б) со четири стапести громобрани

Објектите какви што се разводните постројки се пространи по површина. Затоа тие се штитат со поголем број стапести громобрани. Во тој случај надворешниот дел од заштитната зона се определува на ист начин како и заштитната зона на два громобрана (сл. 3.6). Објектот со височина  $h_x$  кој што се наоѓа внатре во косоаголниот триаголник или во правоаголникот во чии врвови се поставени стапести громобрани ќе биде заштитен од директни удари на громот ако дијаметарот  $D$  на кругот што минува низ врвовите на триаголникот во кои што се поставени громобраните односно дијагоналата  $D$  на правоаголникот во чии агли се наоѓаат громобраните, го задоволуваат условот:

$$D \leq 8p \cdot (h - h_x) = 8p \cdot h_a. \quad (3.4)$$

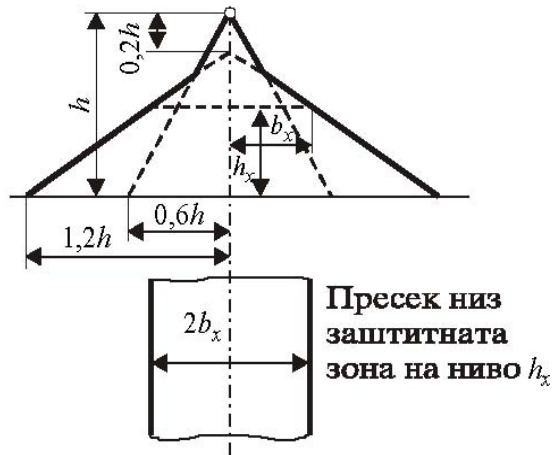
Ако громобраните се поставуваат произволно, условот (3.4) треба да биде проверен посебно за секои три најблиски еден до друг громобрани. При исти услови височината  $h_x$  треба да биде помала од фиктивната височина  $h_0$  определена за секој пар громобрани земени посебно.

### 3.2.4. Заштитна зона на земјоводни јажиња

а) *Едно заштитно јажје*. Вертикалниот пресек на заштитната зона на земјоводно јажје се црта исто како кај стапестиот громобран, но со други коефициенти. Упростена слика на заштитната зона на единично јажје е прикажана на сликата 3.7.

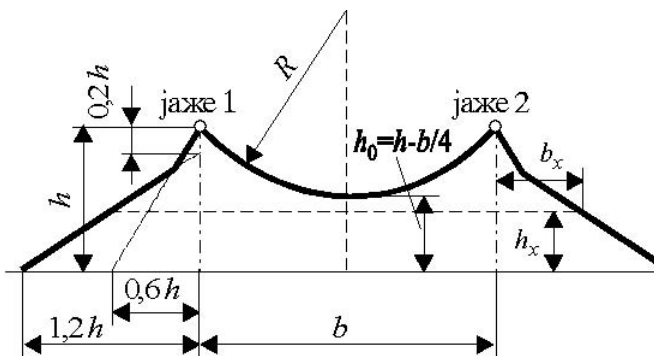
Широчината на зоната на ниво на земјата за единично земјоводно јажје изнесува  $1,2ph$ . Соодветните равенки за генератрисите коишто ја дефинираат заштитната зона се дадени со изразите (3.5).

$$b_x = \begin{cases} 0,6h \cdot \left(1 - \frac{h_x}{h}\right) & \text{за } h_x \geq \frac{2}{3}h \\ 1,2h \cdot \left(1 - 1,25 \cdot \frac{h_x}{h}\right) & \text{за } h_x < \frac{2}{3}h \end{cases} \quad (3.5)$$



Сл. 3.7. Заштитна зона за едно заштитно јаже

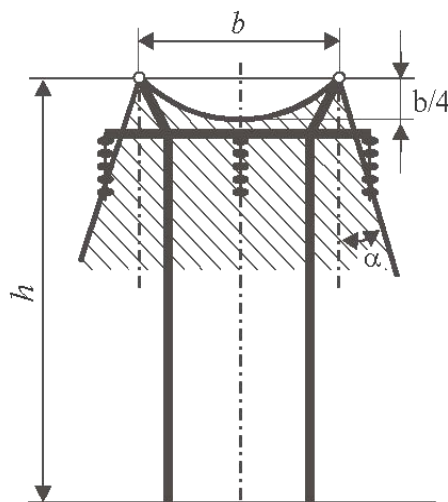
б) *Две заштитни јажиња.* Во случајот кога заштитата е изведена со две заштитни јажиња со иста височина  $h$ , паралелно поставени на меѓусебно растојание  $b$  (сл. 3.8) надворешниот дел на заштитната зона се определува на ист начин како и за единично јаже. Максималното растојание  $b$  помеѓу двете јажиња ќе зависи од височината  $h_x$  на штитениот објект(и). Тоа се определува врз основа на истите размислувања како и во случајот со два стапести громобрана, со напомена дека зоната на 100% удар за едно заштитно јаже изнесува  $2h$ . Значи во тој случај мора да биде задоволен условот  $b \leq 4h$ .



Внатрешниот дел од заштитната зона на две паралелни јажиња е ограничен со површината која во пресек со површината која е нормална на јажињата дава лак што минува низ три точки: низ двете јажиња и низ точката на средината меѓу нив на височина  $h_0$  определена со релацијата (3.6):

$$h_0 = h - \frac{b}{4p} \quad (3.6)$$

Сл. 3.8. Заштитна зона на две паралелни јажиња



Слика 3.9. Заштитен агол и заштитна зона на две јажиња кај преносен вод

Кога се работи за заштита на фазните спроводници кај надземните водови (слика 3.9), условот за ефикасна заштита на средниот спроводник при хоризонтално поставување на спроводниците при заштита со две заштитни јажиња се определува со помош на релацијата (3.7):

$$b \leq 4p \cdot (h - h_x) = 4p \cdot (h_{zj} - h_{pr}) \quad (3.7)$$

Во оваа релација со  $h = h_{zj}$  и  $h_x = h_{pr}$  се означени висините на заштитното јаже и фазните спроводници – респективно.

Условот (3.7), со оглед на важноста на ваквата заштита, треба да биде задоволен со значителна резерва.

При разгледување на условите за заштита на надворешните спроводници (или кој било спроводник при заштита со едно заштитно јаже) обично се користи поимот заштитен агол (на сликата 3.9 означен со  $\alpha$ ). За заштитната зона на висина на фазните спроводници ( $h_x = h_{pr}$ ) од сликата 3.7 се добива:

$$\alpha = \arctg \frac{0,6h}{h} = \arctg(0,6) = 31^\circ.$$

### 3.3. ВЕРОЈАТНОСТЕН ПРИОД КОН ЗАШТИТНИТЕ ЗОНИ НА ГРОМОБРАНИТЕ – ЕЛЕКТРОГЕОМЕТРИСКИ МОДЕЛ (ЕГМ)

#### 3.3.1. Вовед

Наспроти лабораторискиот пристап за определувањето на заштитната зона на громобраните, реализиран во повеќе земји во првата половина на минатиот век, во изминатите 50-тина години се спроведени низа теориски истражувања кои имале за цел:

- да се процени веројатноста за удар на гром во објектот;
- да се определи заштитата на објектот така што ќе се редуцира, до прифатливо ниво, ризикот од прескок (пробој) на изолацијата.

И двете процедури базираат на истражувањето на физичките процеси кои што се одвиваат за време на завршниот стадиум од развивањето на надолниот лидер на громот. Проучувањето на овие комплексни процеси како и улогата на штитените објекти во тие процеси довело до нови сознанија и нов модел за прикажување на завршниот стадиум од развивањето на надолниот лидер на громот, познати под името електрогеометриски модел – ЕГМ.

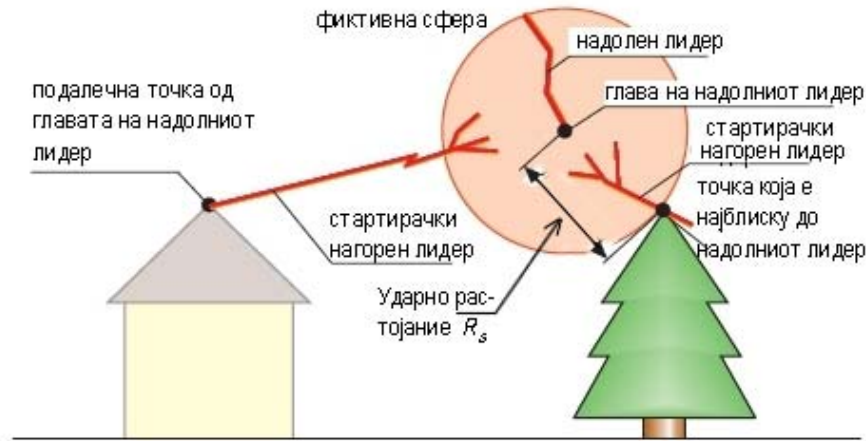
Во основа на овој модел е концептот на *ударното растојание*. Него можеме да го дефинираме како најмалото, критично, растојание помеѓу надземен објект (или земјата) и лидерот на громот, на коешто лидерот мора да дојде пред да биде определена точката на ударот. Затоа ова растојание се нарекува уште и *височина на ориентација* затоа што сè додека надолниот лидер не се спушти доволно ниско, до оваа височина, тој нема да може да се "реша" каде ќе го заврши својот пат.

Врз основа на набљудувањата на ударот на гром на високи надземни објекти е утврдено дека завршната фаза на спуштањето на надолниот удар на громот настанува кога ќе се постигне:

- доволно доближување на барем еден од деловите на надолниот лидер и воспоставување на критично електрично поле на врвот на објектот спрема кој надолниот лидер е насочен и кое може да предизвика појава на нагорен лидер со којшто би се споил надолниот лидер;
- успешно комплетирање на процесот на пресретнување на надолниот и нагорниот лидер.

Овие услови се неопходни услови за остварување на ударот на громот во објект или на земјата.

Надолниот лидер на громот има голема должина, која достигнува и неколку km. Тој е разгранет и при неговото спуштање, во просек, помеѓу облакот и земјата се појавуваат во 3 до 5 големи гранки така што критериумот на ударното растојание може да биде постигнат во неколку независни точки или објекти на земјата за време на спуштањето на лидерот.



**Слика 3.10. Старирачки нагорен лидер кој го дефинира местото на ударот**

Со приближувањето на надолниот лидер кон земјата, во еден момент, тој ја достигнува точката во која одлучува (ако може да му се припише такво својство) во кој објект ќе удри. Тоа е објектот до кој што во тој момент растојанието од главата на лидерот до најблиската точка на тој објект е еднакво на ударното растојание (слика 3.10). Електрогеометрискиот модел го опишува овој концепт на избор на точката на ударот со воведувањето на поимот ударно растојание.

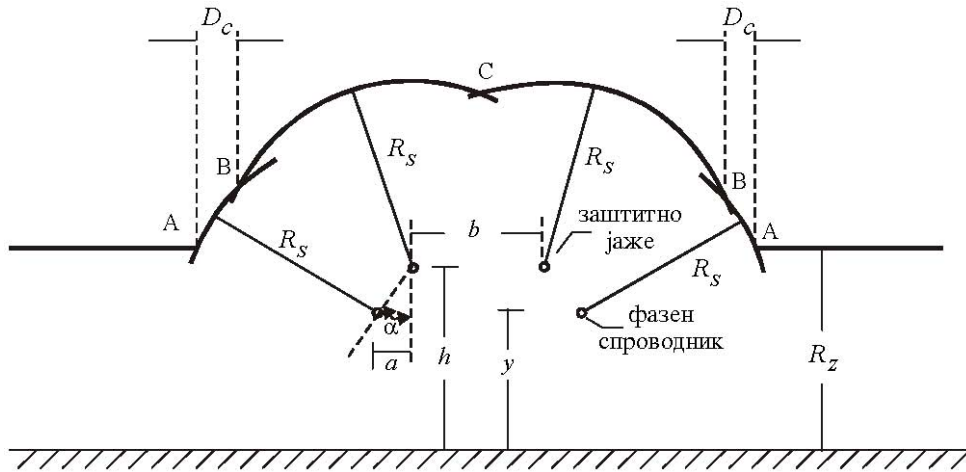
Експериментите во лабораторија покажале дека големината на ударното растојание  $R_s$  зависи од количеството на полнеж што се содржи во каналот на лидерот, или посредно, зависи од темената вредност на струјата на громот  $I_m$ . Таа зависност, според повеќето научници, го има следниот облик:

$$R_s = K \cdot I_m^n,$$

каде што  $K$  и  $n$  се константи коишто зависат од објектот изложен на удар (фазен спроводник, з. јаже или земјата), а  $I_m$  е темената вредност на струјата на громот. Но од практични причини е општо прифатено дека пресметките на загрозеноста од директен удар треба да се вршат со вредностите  $K = 10$  и  $n = 0,65$ , така што големината на ударното растојание се определува со помош на релацијата (3.8):

$$R_s = 10 \cdot I_m^{0,65}. \quad (3.8)$$

Во наредниот дел ќе ја определиме *атрактивната површина* на фазните спроводници и на заштитните јажиња кај надземните водови. За таа цел ќе ја посматраме сликата 3.11 на која е прикажана главата од еден надземен вод со две заштитни јажиња и со хоризонтален распоред на фазите. Атрактивната површина за нивото на земјата е рамнина паралелна со земјата, на растојание  $R_s$  од неа. Атрактивната површина за една точка е сфера со радиус  $R_s$  додека за хоризонтален спроводник (односно заштитното јаже) таа претставува цилиндрична површина со радиус на напречниот пресек еднаков на  $R_s$ , која на двата краја завршува со полутопки со ист радиус. Делови од атрактивните површини на секој од разгледуваните елементи меѓусебно се екранирани. Во случај на повеќе објекти атрактивните површини можат да се сечат, односно дел од една атрактивна површина може да биде покриен со друга.



Сл. 3.11. Претстава за спроводниците и земјоводните јажиња според EGM

Доколку надолниот лидер со струја  $I_m$  на којашто и' соодветствува ударното растојание  $R_s$  од сликата 3.11, го допре лакот помеѓу точките А и В, ударот ќе заврши во еден од фазните спроводници. Доколку, пак, лидерот допре некоја точка од лаките помеѓу точките В и С, ударот ќе заврши во заштитно јаже. Според тоа, постоењето на откриената површина  $\overline{AB}$  е мерка за веројатноста на отказ односно затајување (failure) на заштитата од атмосферски празнења. Делот од атрактивната површина на некој објект, изложен на удар, а притоа не е екраниран од некоја друга атрактивна површина, се вика *изложена (откриена) површина*. Во случајот прикажан на сликата 3.11, изложени површини за фазните спроводници се деловите од цилиндерот што одговараат на лаките А – В, додека изложени површини за заштитните јажиња се деловите од цилиндерот што одговараат на лаките В – С.

### 3.3.2. Заштитни зони на карактеристични конфигурации громобрани

Во наредниот дел ќе бидат прикажани изразите за пресметување на изложените површини на вертикален (стапест) громобран и хоризонтален громобран (заштитно јаже).

*Вертикален стапест громобран.* Во овој случај изложената површина е круг (проекција на сфера со радиус еднаков на ударното растојание  $R_s$  и центар на врвот од громобранот). Плоштината на заштитната зона во тој случај ќе биде:

$$S_k = \pi \cdot R_s^2. \quad (3.9)$$

*Хоризонтален спроводник/јаже.* Изложената површина во овој случај е правоаголник (проекција на цилиндар со радиус еднаков на ударното растојание  $R_s$  чија што оска се поклопува со спроводникот) и два полукруга кои се добиваат како проекции на круговите со центар на двата краја од спроводникот, како во претходниот случај. Изложената површина  $S_k$  во вид на правоаголник може да се прикаже со изразите:

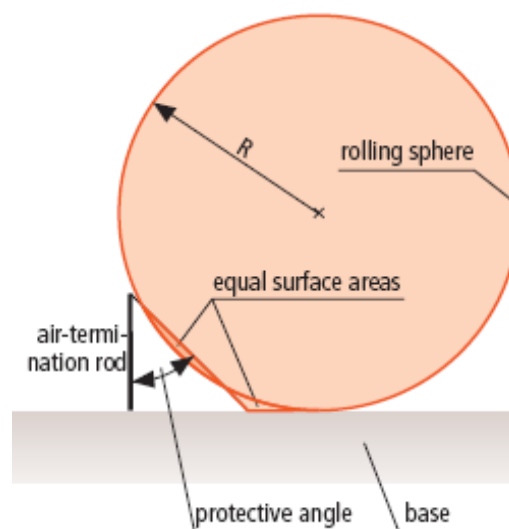
$$S_k = 2 \cdot W_k \cdot L, \quad (3.10)$$

$$W_k = \begin{cases} R_s; & R_s > h \\ \sqrt{R_s^2 - (R_s - h)^2}; & R_s \leq h \end{cases}. \quad (3.11)$$

каде што се:  $S_k$  – изложена површина за амплитуда на струјата на громот  $I_k$  што според релацијата (3.8) одговара на ударното растојание  $R_s$ ;  $h$  – височина на хоризонталниот спроводник;  $R_s$  – ударно растојание.



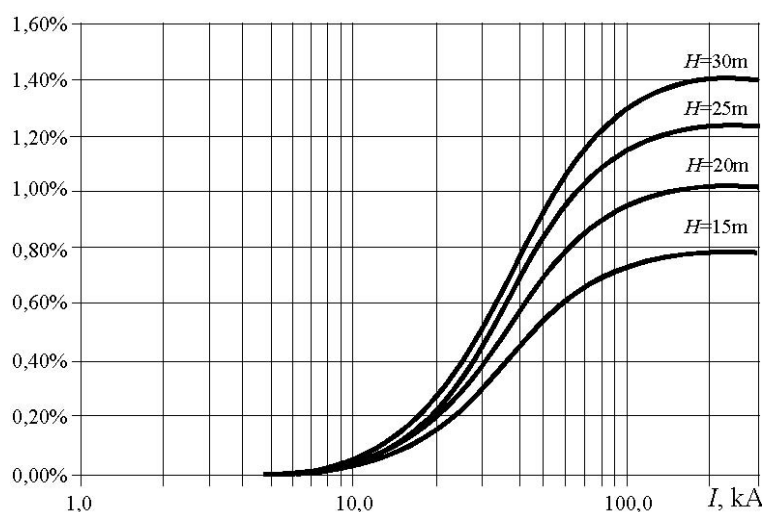
Заштитната зона на стапест громобран се определува со помош на електрогеометрискиот модел на следниот начин. Се усвојува максималната амплитуда на струјата  $I$  на громот која е дозволена да продре во заштитната зона и со нејзина помош се пресметува соодветното ударно растојание. Топката со радиус еднаков на ударното растојание (rolling sphere) се ротира околу громобранот, но така што во секој момент ги допира земјата но и громобранот (слика 3.12). Геометриското тело што ќе настане притоа е бараната заштитна зона. Секој објект што ќе се најде целосно во неа, по дефиниција, е заштитен од атмосферски празнења со амплитуда поголема од  $I$ .



Слика 3.12. Дефиниција на заштитен агол со помош на тркалачка топка

На тој начин се вршени пресметки на атрактивните површини, заштитните зони а потоа и пресметки на бројот на директни празнења во стапестиот громобран, во зависност од амплитудата на струјата на громот.

На крајот е пресметуван вкупниот број на ударите во стапест громобран со височина  $h$  од неговата височина, при позната густина на ударите на  $1 \text{ km}^2$   $N_g$ . Притоа бројот на ударите се дадени во проценти од ударите бројот на ударите  $N_g$  на  $1 \text{ km}^2$ , за разни височини на громобранот  $h$ . Резултатите од пресметките се прикажани на сликите 3.13 и 3.14.

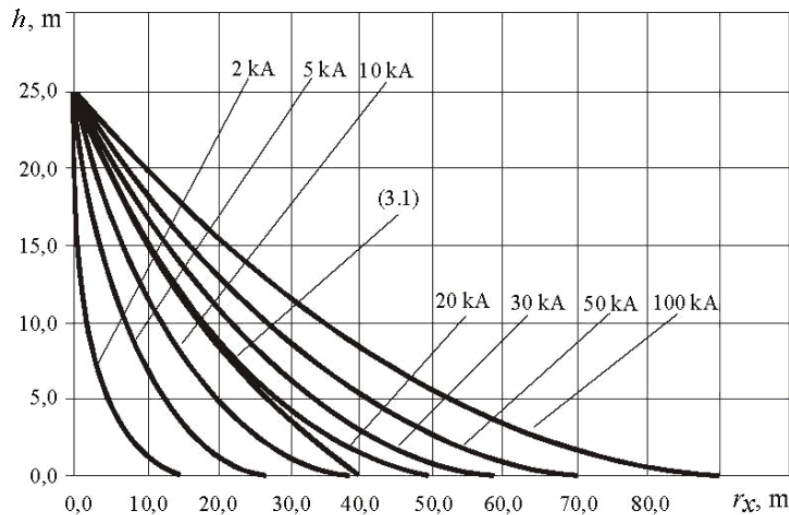


Сл. 3.13. Зависност на бројот на удари во стапест громобран (во проценти од ударите во  $1 \text{ km}^2$ ) со амплитуда  $I$

На сликата 3.14. се дадени заштитните зони на еден стапест громобран со височина  $h=25 \text{ m}$ , според моделот ЕГМ. Определени се по неколку заштитни зони, според ЕГМ, за максимални продорни струи од 2, 5, 10, 20, 30, 50 и 100 kA. Освен тоа пресметана е и заштитната зона на громобранот според класичниот, експериментален пристап, во согласност со релацијата (3.1), определена со ризик од 0,1%.

Се забележува дека заштитната зона определена според (3.1) практично се поклопува со онаа определена според ЕГМ за вредности на струјата на громот во граници од 10 до 20 kA.





Сл. 3.14. Заштитни зони на стапест громобран за  $h = 25$  m

Постоењето на заштитните јажиња не гарантира 100%–на доверливост на заштитата. Секогаш постои некоја веројатност да настане удар на спроводникот покрај земјоводното јаже, односно да дојде до продор на громот покрај заштитата на јажето – појава наречена "отказ на заштитата".

За разлика од постројките чијашто територија е изложена на еден удар во текот на неколку години, водовите се изложени на директни удари десетици пати во текот на една непогодна сезона. Затоа, макар и многу малата веројатност за продори на громот и отказ на заштитата, има битно значење за сигурноста на погонот на самиот вод.

Ако, како што е веќе наведено, се усвои дека сите лидери се вертикални, тогаш растојанието  $D_C$  е мерка на веројатноста да откаже заштитата од атмосферски празнења на водот (сл. 3.11), за една определена вредност на струјата  $I$ . Бидејќи веројатноста да се појави оваа струја е  $f(I) \cdot dI$ , (каде што  $f(I)$  е густина на веројатноста на распределбата на струјата на громот, според изложеното во втората глава) тогаш бројот на откази на заштитата при струја  $I$  е  $N_g \cdot L \cdot D_C(I)$ , помножено со  $f(I) \cdot dI$ , каде што  $L$  е должината на водот.

Со пораст на струјата расте и ударното растојание  $R_s$ , а величината  $D_C$  опаѓа. Конечно ќе се достигне вредност на струјата  $I = I_{\max}$  за којашто ќе биде  $D_C = 0$ .

Со цел да се споредат конструкциите на водовите од аспект на ефикасноста на заштитата од директните удари на громот, се разгледуваат водови еднакви должини  $L = 100$  km. Во тој случај бројот на откази на заштитата се означува со  $SFR$  (*shielding failure rate*), а се нарекува *ниво на откази на заштитата* или ниво на директни удари на громот во фазните спроводници. Оваа величина се дефинира на следниот начин:

$$SFR = 2L \cdot N_g \cdot \int_{I_{\min}}^{I_{\max}} D_C(I) \cdot f(I) \cdot dI . \quad (3.12)$$

Долната граница на струјата  $I_{\min}$  обично изнесува 3 kA. Таа укажува на тоа дека постои долна граница на атмосферското празнење, а факторот 2 пред интегралот го зема предвид фактот што постои симетрија на бројот на ударите од обете страни на столбот.

Кога громот ќе ја "пробие" заштитата и дојде до директен удар на громот во фазниот спроводник може да настанат два случаја: а) појава на прескок на изолацијата и испад на водот и б) прескок на изолацијата не настанал. Доколку напонот на спроводникот којшто е резултат на отказот на заштитата и директниот удар на громот во фазниот спроводник, што ќе се воспостави на погодената фаза во форма на напонски бран, е понизок од импулсниот прескочен напон на изолацијата на водот, (што е малку веројатно) тогаш нема да дојде до

прескок на изолацијата и испад на водот. Но најчесто доаѓа до обратниот случај кога пренапонот ја надминува импулсната цврстина на изолацијата  $U_{50\%}$  а тоа резултира со нејзин прескок.

Покрај величината  $SFR$ , ефикасноста на громобранската заштита кај надземните водови се оценува и со помош на една друга величина, наречена *ниво на прескоци на изолацијата на водот* како последица од директни удари на гром во фазните спроводници. Таа обично се бележи со ознаката  $SFFR$  (*shielding failure flashover rate*).

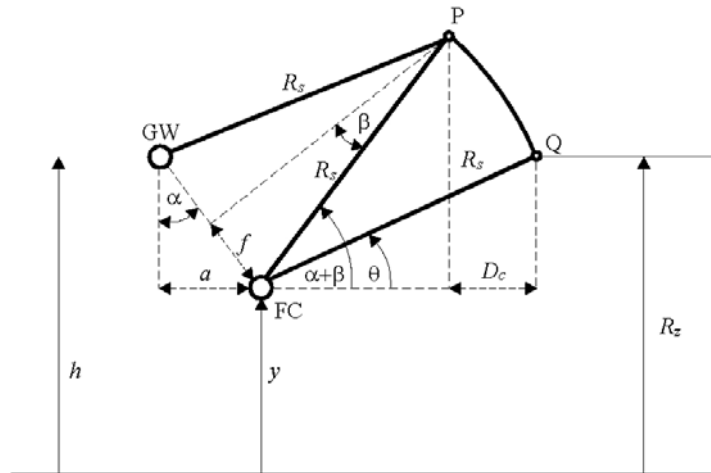
Со цел да се определи параметарот  $SFFR$  на еден вод најнапред се пресметува долната граница на интегралот во (3.12)  $I_{min}$ . Нејзината вредност се пресметува со помош на изразот (3.13):

$$I_{min} = 2 \cdot \frac{U_{50\%}}{Z_C} \quad (3.13)$$

каде што  $Z_C$  е бранова импеданција на фазниот спроводник. Релацијата (3.13) е изведена под претпоставката дека брановата импеданција на каналот на громот е бесконечно голема, што не е сосема коректно но тоа нема битно влијание врз точноста на пресметките. На тој начин, со познатите граници  $I_{min}$  и  $I_{max}$  на интеграција се добива вредноста на нивото на прескоци  $SFFR$ :

$$SFFR = 2L \cdot N_g \cdot \int_{I_{min}}^{I_{max}} D_C(I) \cdot f(I) \cdot dI \quad (3.14)$$

Како што може да се забележи од (3.14), доколку  $I_{max}$  е еднакво на  $I_{min}$ , тогаш  $SFFR = 0$  па според тоа, од математичка гледна точка, кај таквите водови постои *совршен заштитен агол*. Него можеме да го определиме врз основа на следниве разгледувања (сл. 3.14).



Сл. 3.14. Конфигурација за определување на заштитниот агол според ЕГМ  
**Легенда:** GW – земјоводно јаже, FC – фазен спроводник

Со растењето на струјата на громот расте и ударното растојание  $R_s$ , додека растојанието  $D_C$  опаѓа. При струја на громот  $I = I_{max}$ , се добива  $D_C = 0$ . Вредноста на струјата  $I_{max}$  за која се добива  $D_C = 0$  може да се процени апроксимативно со помош на следниот израз:

$$R_{s,max} = \frac{h+y}{2 \cdot (1 - \sin \alpha)}; \quad \log I_{max} = \frac{1}{0,65} \cdot \log (R_{s,max} / 10) \quad (3.16)$$

Од геометријата прикажана на сл. 3.14 се добива:

$$D_C = R_s \cdot [\cos \theta - \cos(\alpha + \beta)] \quad (3.17)$$

каде што  $\alpha$  е заштитен агол прикажан на сл. 3.11 и 3.14, додека за аголот  $\theta$ , во согласност со сликата 3.14 ќе важи:

$$\theta = \arcsin \frac{R_s - y}{R_s}. \quad (3.18)$$

Понатаму, врз основа на сликата 3.14 се добива релацијата (3.19):

$$\beta = \arctg \left( \sqrt{a^2 + (h - y)^2} / 2R_s \right). \quad (3.19)$$

Од равенката (3.14) се забележува дека  $SFFR = 0$  ако е  $I_{\max} \leq I_{\min}$ . Заштитниот агол што се постигнува кога е исполнет условот  $I_{\max} = I_{\min}$  обично се бележи со  $\alpha_{\text{Perfect}}$  и се нарекува *совршен заштитен агол*. Понатаму, од геометријата се добива:

$$\alpha_{\text{Perfect}} = \frac{1}{2} \cdot \left( \arcsin \frac{R_{s,\min} - h}{R_{s,\min}} + \arcsin \frac{R_{s,\min} - y}{R_{s,\min}} \right). \quad (3.20)$$

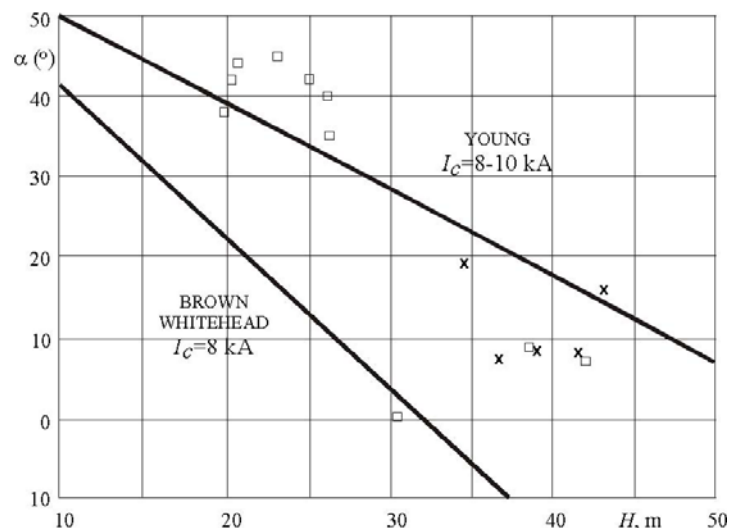
Во (3.20) фигурира ударното растојание  $R_{s,\min}$  кое е дефинирано со струјата  $I_{\min}$  и со релацијата (3.8).

Треба да се нагласи дека примарната цел за развојот на електрогеометрискиот модел била да се истражи зависноста на заштитниот агол на надземниот вод од неговата височина.

### 3.3.3. Заштитни агли кај водовите

Врз основа на Вагнер-овиот (Wagner) упростен модел за последниот стадиум на ударот на громот, Јанг (Young) го развил електрогеометрискиот модел со кој покажал дека заштитните агли треба да опаѓаат со порастот на височината на столбовите. Пред тоа се употребувале заштитни агли од околу  $30^\circ$  кај поголемиот број водови чии столбови имале височина до 24 m. Резултатите од истражувањата на Јанг се прикажани на сл. 3.15, каде што е претставена зависноста на потребниот заштитен агол од височината на столбот. Може да се забележи дека, според овие истражувања, за водовите со напон 345 kV се препорачува заштитен агол од околу  $15^\circ$ . За нормални височини на столбови од 25 до 30 m се задржува претходно препорачаната вредност од  $30^\circ$ .

Армстронг (Armstrong) и Вајтхед (Whitehead), а потоа Браун (Brown) и Вајтхед во ЕГМ ја модифицирале пробојната јачина на електричното поле и, за разлика од претходните истражувања на Јанг, кој претпоставувал постоење само на вертикални удари, ја вовеле претпоставката дека лидерот на громот може да упадне во штитетниот систем и под некаков агол. Нивниот предлог е прикажан на сликата 3.15 (долна права), каде што е прикажана зависноста на просечниот заштитен агол на водот од просечната височина  $H$  на заштитното јаже.



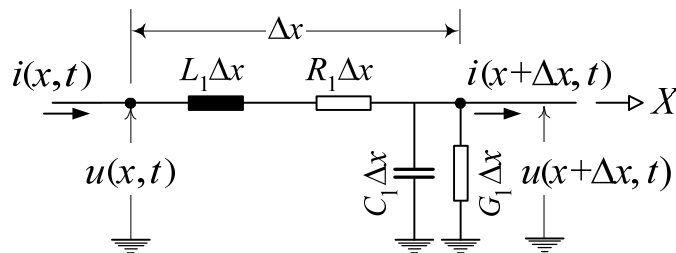
Слика 3.15. Зависност на заштитниот агол од височината на водот ( $I_c = I_{\min}$ , според (3.13))  
 □) 115 – 132 kV ( $I_{\min} = 3,1 - 4,3$  kA); x) 345 kV ( $I_{\min} = 8,5$  kA)

## 4. ПРОСТИРАЊЕ НА БРАНОВИ ПО ВОДОВИТЕ

### 4.1. РАВЕНКИ НА ПРОСТИРАЊЕ

Анализата на пренапоните што се јавуваат кај надземните водови поради атмосферските празнења води кон решавање на познатите *равенки на простирање* кои се познати и како "*телеграфски равенки*". Кај нив водовите (вклучувајќи ги тука и енергетските кабли) се претставуваат како елементи со распределени параметри. Кај овие анализи, коишто имаат за цел пресметка на преодните процеси на водовите при појава на атмосферски пренапони, доволно е водот да се посматра монофазно и да се анализираат само приликите во погодената фаза бидејќи со тоа се губи малку на точност но така што добиените резултати ќе бидат сè уште во технички прифатливите граници. За возврат на тоа анализите стануваат многу поедноставни.

На сликата 4.1 е прикажан елементарен дел од еден вод со должина  $\Delta x$ . Водот се протега над рамна и идеално спроводна земја. Ќе претпоставиме дека почетните услови на водот се нула т.е. напоните и струите во секоја точка од водот во моментот  $t = 0$ , кога започнува анализата на преодниот процес, се еднакви на нула иако во општ случај тие имаат некакви вредности кои, во споредба со висината на напоните и струите што се јавуваат за време на преодниот процес, се толку мали што можат да се занемарат.



Слика 4.1. Монофазен вод над рамна, идеално спроводна земја

Одделните величини што фигурираат на сликата 4.1. ги имаат следните значења:

$\Delta x$  – должина на елементарната делница на водот:

$u(x, t)$  и  $i(x, t)$  – моментна вредност на напонот/струјата во посматраната точка со координата  $x$  во моментот  $t$  ;

$R_1, L_1, G_1, C_1$  – подолжни параметри на водот: активна отпорност, индуктивност, активна одводност (кондуктанција) и капацитивност на водот по единица должина.

Ќе претпоставиме дека подолжните параметри на водот се константни и независни од режимските параметри  $u(x, t)$  и  $i(x, t)$  иако тоа не е сосема така. Во тој случај врз основа на сликата 4.1. ќе можеме да ги напишеме следните равенки:

$$u(x, t) = u(x + \Delta x, t) + L_1 \cdot \Delta x \cdot \frac{\partial i(x, t)}{\partial t} + R_1 \cdot \Delta x \cdot i(x, t); \quad (4.1a)$$

$$i(x, t) = i(x + \Delta x, t) + C_1 \cdot \Delta x \cdot \frac{\partial u(x + \Delta x, t)}{\partial t} + G_1 \cdot \Delta x \cdot u(x + \Delta x, t). \quad (4.2a)$$

Разликата  $\Delta u(x, t) = u(x + \Delta x, t) - u(x, t)$  на напоните на почетокот и на крајот од сегментот на водот со должина  $\Delta x$  претставува прираст на напонот. Слично разликата  $\Delta i(x, t) = i(x + \Delta x, t) - i(x, t)$  претставува прираст на струјата во истиот сегмент од водот. На тој начин можеме да пишуваме:

$$-\Delta u(x,t) = L_1 \cdot \Delta x \cdot \frac{\partial i(x,t)}{\partial t} + R_1 \cdot \Delta x \cdot i(x,t); \quad (4.16)$$

$$-\Delta i(x,t) = C_1 \cdot \Delta x \cdot \frac{\partial u(x+\Delta x,t)}{\partial t} + G_1 \cdot \Delta x \cdot u(x+\Delta x,t). \quad (4.26)$$

Ако последните два израза се поделат со должината  $\Delta x$  и се определи границата (limes) на тие изрази кога должината на сегментот  $\Delta x$  тежи кон нула ( $\Delta x \rightarrow 0$ ) ќе се добијат следните релации:

$$-\frac{\partial u(x,t)}{\partial x} = L_1 \frac{\partial i(x,t)}{\partial t} + R_1 \cdot i(x,t); \quad (4.3)$$

$$-\frac{\partial i(x,t)}{\partial x} = C_1 \frac{\partial u(x,t)}{\partial t} + G_1 \cdot u(x,t). \quad (4.4)$$

кои претставуваат систем парцијални диференцијални равенки по непознатите  $u(x,t)$  и  $i(x,t)$ . Решението на овој систем диференцијални равенки во временски домен може да се добие во аналитичка форма само за следните два случаја:

случајот на идеален вод (вод без загуби) кај кој што е исполнет условот  $R_1 = 0$  и  $G_1 = 0$  и

случај на т.н. "Хевисајдов" (Heaviside) вод за кој е исполнет условот (4.5):

$$\frac{R_1}{L_1} = \frac{G_1}{C_1}. \quad (4.5)$$

#### 4.1.1. Решение на равенките на простирање за идеален вод

Решението на равенките на простирање за случајот кога е водот без загуби ( $R_1 = 0$  и  $G_1 = 0$ ) гласи:

$$u(x,t) = f_1\left(t - \frac{x}{v}\right) \cdot h\left(t - \frac{x}{v}\right) + f_2\left(t + \frac{x}{v}\right) \cdot h\left(t + \frac{x}{v}\right) \quad (4.6a)$$

$$i(x,t) = \frac{1}{Z_c} \cdot f_1\left(t - \frac{x}{v}\right) \cdot h\left(t - \frac{x}{v}\right) - \frac{1}{Z_c} \cdot f_2\left(t + \frac{x}{v}\right) \cdot h\left(t + \frac{x}{v}\right) \quad (4.6b)$$

Во релациите (4.6) се воведени следните обележувања:

$$Z_c = \sqrt{\frac{L_1}{C_1}} \text{ - бранова импеданција на водот;} \quad (4.7)$$

$$v = \frac{1}{\sqrt{L_1 \cdot C_1}} = \frac{1}{\sqrt{\mu \cdot \varepsilon}} \text{ - брзина на простирање на брановите.} \quad (4.8)$$

Величината  $\mu$  се нарекува *магнетска пермиабилност* на средината во која што се простираат електромагнетските бранови. Слично, величината  $\varepsilon$  се нарекува *диелектричка константа* на средината во која што се простираат електромагнетските бранови.

За случајот кога се работи за простирање по надземен вод ќе имаме:

$$\varepsilon = \varepsilon_0 = 10^{-9} / 36\pi \text{ (F/m) - диелектричка константа на воздухот;} \quad (4.9)$$

$$\mu = \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ (H/m) - магнетска пермиабилност на воздухот.} \quad (4.10)$$

$$v = \frac{1}{\sqrt{L_1 \cdot C_1}} = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \cdot \varepsilon_0}} = 3 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}; \quad (4.11)$$

$$L_1 = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \ln \frac{2h_{pr}}{r_{pr}} \left( \frac{\text{H}}{\text{m}} \right) - \text{подолжна индуктивност на водот}; \quad (4.12)$$

$$C_1 = \frac{2\pi \cdot \varepsilon_0}{\ln(2h_{pr}/r_{pr})} \left( \frac{\text{F}}{\text{m}} \right) - \text{подолжна капацитивниот на водот}. \quad (4.13)$$

$$Z_C = \sqrt{\frac{L_1}{C_1}} = 60 \cdot \ln \frac{2h_{pr}}{r_{pr}} (\Omega). \quad (4.14)$$

Вообичаената вредност на брановата импеданција  $Z_C$  на надземните водови се движи во границите од 300 до 500  $\Omega$  додека за кабелските водови таа се наоѓа во границите од 50 до 80  $\Omega$ , што зависи од вредностите на  $\mu$  и  $\varepsilon$  на диелектрикот во кабелот.

Во равенките (4.12) – (4.14) со  $h_{pr}$  е означена просечната височина на спроводникот над земјата, додека со  $r_{pr}$  е означен радиусот (полупречникот) на спроводникот.

Изразите (4.6) претставуваат збирови од два брана кои се простираат по водот во спротивни насоки. Со  $h(t)$ , пак, во (4.6) е означена единечната Хевисајдова (Heaviside) отскочна функција. Оваа функција е дефинирана со изразот (4.15)

$$h(t) = \begin{cases} 0 & \text{за } t < 0 \\ 1 & \text{за } t \geq 0 \end{cases} \quad (4.15)$$

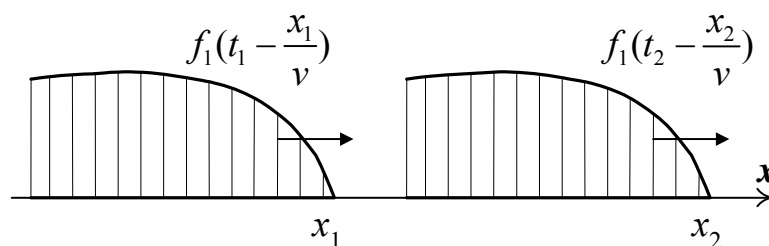
Со  $f_1$  и  $f_2$  во (4.6) се означени некакви функции со кои што се опишани облиците на брановите што се простираат по водот кон посматраната точка со координата  $x$ .

Ако се посматра само првиот член од изразот (4.6а),  $f_1(t-x/v)$ , ќе забележиме дека тој ќе има константа вредност за константен аргумент  $(t-x/v)$ . За да биде неговиот аргумент константен ќе биде потребно со порастот на времето  $t$  да расте и координатата  $x$  и тоа со брзина  $v$ . Значи навистина членот  $f_1(t-x/v)$  има природа на напонски бран кој што се движи (простира) во насока на пораст на координатата  $x$ , со брзина  $v$ . Овој бран ќе го нарекуваме "директен бран".

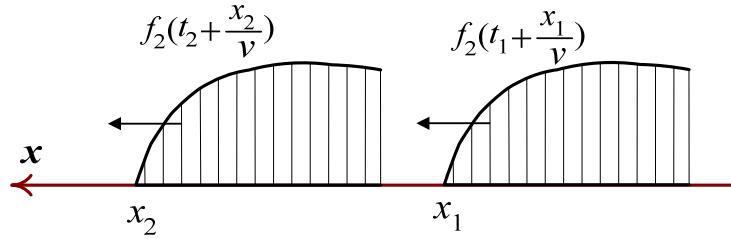
Слично се заклучува дека членот  $f_2(t+x/v)$  претставува напонски бран кој што се движи во спротивна насока од претходниот, во насока на намалување на координатата  $x$ , со брзина  $v$ . Него ќе го нарекуваме "инверзен бран".

Размислувајќи аналогно ќе заклучиме дека струјата  $i(x,t)$  во била која точка  $x$  од водот ќе се добие како збир од два струјни брана од кои што првиот е "директен", бидејќи се движи во насока на пораст на координатата  $x$  додека вториот е инверзен. Се забележува дека облиците на напонските и струјните бранови се исти бидејќи струјните бранови се добиваат делејќи ги напонските бранови со вредноста на брановата импеданција  $Z_C$ .

На сликите 4.2 и 4.3 се илустрирани движењата на директните и инверзните напонски бранови.



**Слика 4.2. Простирање на директниот напонски бран по водот во насока на пораст на координатата  $x$**



Слика 4.3. Простирање на инверзниот напонски бран по водот во насока на намалување на координатата  $x$

Во случајот на идеален вод (вод без загуби) облиците на брановите  $f_1$  и  $f_2$  не се менуваат ниту по амплитудата ниту по својот облик, т.е. брановите се простираат долж водот без деформации.

#### 4.1.2. Решение на равенките на простирање за Хевисајдов вод

Може да се покаже дека во овој случај, кога водот не е без загуби и истовремено важи условот (4.5), равенките на простирање ќе имаат облик сличен на претходниот, даден со релациите (4.6). Во овој случај ќе имаме:

$$u(x, t) = f_1\left(t - \frac{x}{v}\right) \cdot e^{-\delta x} \cdot h\left(t - \frac{x}{v}\right) + f_2\left(t + \frac{x}{v}\right) \cdot e^{\delta x} \cdot h\left(t + \frac{x}{v}\right) \quad (4.16a)$$

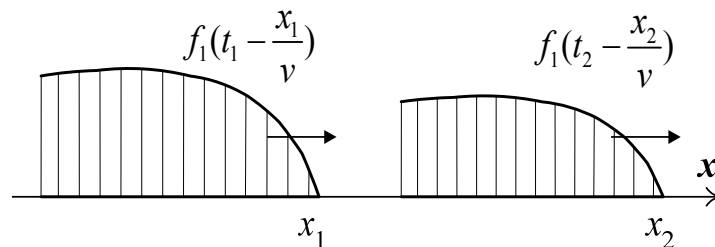
$$i(x, t) = \frac{1}{Z_C} \cdot f_1\left(t - \frac{x}{v}\right) \cdot e^{-\delta x} \cdot h\left(t - \frac{x}{v}\right) - \frac{1}{Z_C} \cdot f_2\left(t + \frac{x}{v}\right) \cdot e^{\delta x} \cdot h\left(t + \frac{x}{v}\right) \quad (4.16б)$$

каде што величината  $\delta$ , која што се нарекува "коэффициент на придушвање", е дефинирана со изразот (4,17):

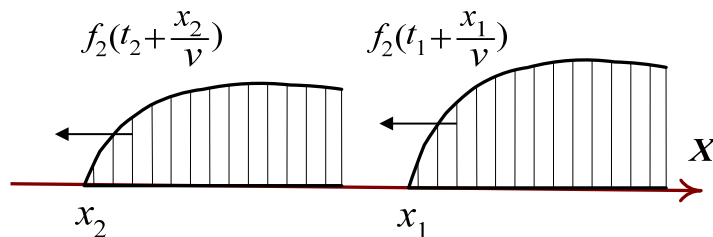
$$\delta = R_1 / Z_C. \quad (4.17)$$

Од изразите (4.16) произлегува дека во случајот кога за водот е исполнет хевисајдовиот услов (4.5) решението на равенките на простирање повторно ќе претставува збир од два брана (струјни односно напонски) кои се простираат во различни насоки. Секој од тие бранови при простирањето ќе се смалува по амплитуда но притоа својот облик не го менува. Таквата промена на амплитудата на бранот при која тој го задржува својот облик се нарекува "придушвање на бранот при простирањето".

Изгледот на директните и инверзните патувачки бранови по водот за кој што е исполнет хевисајдовиот услов е прикажан на сликите 4.4а и 4.4б – респективно.



Слика 4.4а. Простирање на директниот напонски бран по хевисајдов вод



Слика 4.46. Простирање на инверзниот напонски бран по хевисајдов вод

#### 4.1.3. Решение на равенките на простирање за реален вод

Се покажува дека во случајот на реален вод, кога е  $R_1 \neq 0$  и  $G_1 \neq 0$ , упросто посматрано, што важи само за водови со "мали загуби" за кои  $R_1 \rightarrow 0$  и  $G_1 \rightarrow 0$ , какви што се преносните водови, равенките на простирање ќе имаат облик сличен на претходниот облик што се однесуваше на хевисајдовиот вод. Сега приближно, ќе имаме:

$$u(x,t) = f_1\left(t - \frac{x}{v}\right) \cdot e^{-\delta'x} \cdot h\left(t - \frac{x}{v}\right) + f_2\left(t + \frac{x}{v}\right) \cdot e^{\delta'x} \cdot h\left(t + \frac{x}{v}\right) \quad (4.18a)$$

$$i(x,t) = \frac{1}{Z_C} \cdot f_1\left(t - \frac{x}{v}\right) \cdot e^{-\delta'x} \cdot h\left(t - \frac{x}{v}\right) - \frac{1}{Z_C} \cdot f_2\left(t + \frac{x}{v}\right) \cdot e^{\delta'x} \cdot h\left(t + \frac{x}{v}\right) \quad (4.18b)$$

"Коефициентот на придушвање"  $\delta'$ , во овој случај е дефиниран со изразот (4,19):

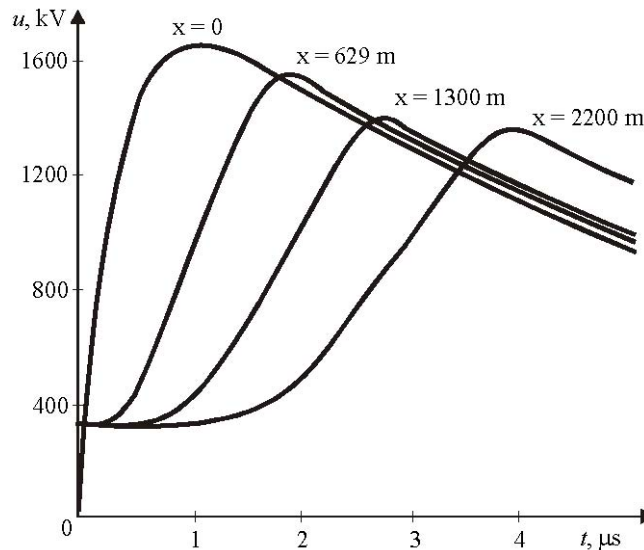
$$\delta' \approx \frac{\delta}{v} = \frac{1}{2} \cdot \left( \frac{R_1}{Z_C} + G_1 \cdot Z_C \right). \quad (4.19)$$

Значи повторно ќе има придушвање на брановите, без нивно изобличување. Но тоа важи само во идеализираниот случај кога е водот со мали загуби ( $R_1 \rightarrow 0$  и  $G_1 \rightarrow 0$ ) и кога подолжните параметри на водот се константни. Во реалноста тоа не е така бидејќи за време на простирањето на брановите доаѓа до сложени процеси кои вршат не само придушвање на брановите по амплитуда, туку и нивно изобличување. Причини за тоа има повеќе, а овде ќе бидат наброени само поважните.

Заради конечната спроводност на земјата се појавува површински (скин) ефект на повратниот пат на струите низ земјата што предивидува изобличување на брановите коишто се простираат. Ова изобличување се нарекува "фреквентно изобличување";

При простирањето на напонските бранови по спроводниците на надземните водови доаѓа до појава на импулсна корона што повторно води до изобличување на брановите поради "нелинеарниот карактер" на параметрите  $G_1$  и  $B_1$ . Импулсната корона притоа има доминантно влијание врз изобличувањето. Доволно е бранот да помине само неколку стотини метри по водот што коронира па веќе да се забележи деформацијата на неговиот облик. За илустрација на кажаното, на сликата 4.5 е прикажан обликот на пренапонски бран на неговата појдовна позиција ( $x = 0$ ) и обликот што ќе го добие по поминувањето на пат од  $x = 629, 1300$  и  $2200$  m–респ. Притоа бранот имал висока амплитуда што довело до појава на интензивна корона на спроводникот, чиј дијаметар изнесува  $d = 23,6$  mm (што би одговарало на нашето јаже Al/Fe 300/50) поради што доаѓа до истовремено зголемување на неговата активна одводност  $G$  и неговата капацитивност  $C$ . Прикажаните резултати се добиени по пресметковен пат на база на модел добиен по експериментален пат, со осцилографирање (Wagner).





Слика 4.5. Облик на патувачкиот бран по изминат пат од 629, 1300 и 2200 m – респективно

## 4.2. ПАТУВАЧКИ БРАНОВИ

### 4.2.1. Дефиниции

Од изразите (4.6) може да се заклучи дека преодниот процес на водот има бранов карактер и дека моментните вредности на напонот односно струјата во било која точка од водот можат да се прикажат како збир од два напонски, односно два струјни, брана. Тие се простираат по водот во спротивни насоки – едниот во директна, а другиот во инверзна насока, па затоа се нарекуваат директен ( $d$ ) и инверзен ( $i$ ) бран. Во натамошниот дел од текстот на директните струјни и напонски бранови ќе им го придружиме индексот  $d$ , а на инверзните – индексот  $i$ . Според тоа, понатаму ќе ги користиме следните ознаки:

$$U_d(t) = f_1\left(t - \frac{x}{v}\right) \cdot h\left(t - \frac{x}{v}\right) \text{ - за директниот напонски бран;}$$

$$U_i(t) = f_2\left(t + \frac{x}{v}\right) \cdot h\left(t + \frac{x}{v}\right) \text{ - за инверзниот напонски бран;}$$

$$I_d(t) = \frac{1}{Z_c} \cdot f_1\left(t - \frac{x}{v}\right) \cdot h\left(t - \frac{x}{v}\right) \text{ - за директниот струен бран;}$$

$$I_i(t) = -\frac{1}{Z_c} \cdot f_2\left(t + \frac{x}{v}\right) \cdot h\left(t + \frac{x}{v}\right) \text{ - за инверзниот струен бран.}$$

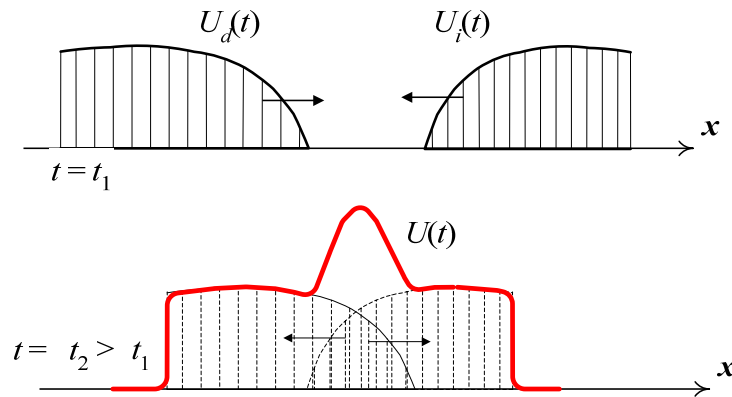
Гледаме дека струјните бранови  $I_d$  и  $I_i$  се добиваат со едноставно делење на соодветните напонски бранови  $U_d$  и  $U_i$  со брановата (карактеристичната) импеданција на водот  $Z_c$ . Знакот (-) кај инверзниот струен бран се должи на фактот што за позитивна насока на струјата е усвоена насоката од лево кон десно, во правец на пораст на координатата  $x$  на водот (видете ја сликата 4.1). Значи, имаме:

$$I_d(t) = \frac{U_d(t)}{Z_c} \tag{4.20}$$

$$I_i(t) = -\frac{U_i(t)}{Z_c} \tag{4.21}$$

Вкупниот напон  $U(t)$  во произволна точка на водот со кордината  $x$  ќе се добие со собирање на директниот и инверзниот бран:

$$U(t) = U_d(t) + U_i(t). \quad (4.22)$$



**Слика 4.6. Облик на напонот што се воспоставува на водот при судир на два патувачки брана**

Слично, вкупната струја  $I(t)$  во произволна точка  $x$  на водот, со насока во правец на порастот на координатата  $x$ , која насока од сега натаму ќе ја нарекуваме "директна насока", ќе биде збир од двата струјни брана  $I_d(t)$  и  $I_i(t)$ , т.е.:

$$I(t) = I_d(t) + I_i(t). \quad (4.23)$$

или

$$I(t) = \frac{U_d(t)}{Z_C} - \frac{U_i(t)}{Z_C}. \quad (4.24)$$

Во практиката постојат случаи кога по водот се простира само еден бран. Така на пример, ако на извесна далечина од местото на посматрање  $x$  удри гром во еден надземен вод, на местото на ударот ќе се воспостави напонски бран кој кон посматраното место ќе се движи со брзина на светлината  $v$ . Ако десно од местото на посматрање  $x$  водот по кој што се простира бранот има бесконечна (или доволно голема должина), тогаш напонот  $U(t)$  во точката  $x$  ќе биде еднаков само на директниот бран  $U_d(t)$ , т.е.

$$U(t) = U_d(t). \quad (4.25)$$

Истото важи и за струјата  $I(t)$  на местото на посматрање. И таа ќе биде еднаква на струјниот бран  $I_d(t)$  што се простира по водот, т.е.:

$$I(t) = I_d(t) = \frac{U_d(t)}{Z_C}. \quad (4.26)$$

Во тој случај за односот помеѓу напонскиот и струјниот директен бран што се простира по бесконечно долгиот вод ќе важи:

$$\frac{U_d(t)}{I_d(t)} = Z_C. \quad (4.27)$$

Значи "влезната" импеданција на еден бесконечно долг вод  $Z_{vl}$ , која што е еднаква на односот на напонскиот и струјниот бран, е еднаква на неговата карактеристична (бранова) импеданција  $Z_C$ :

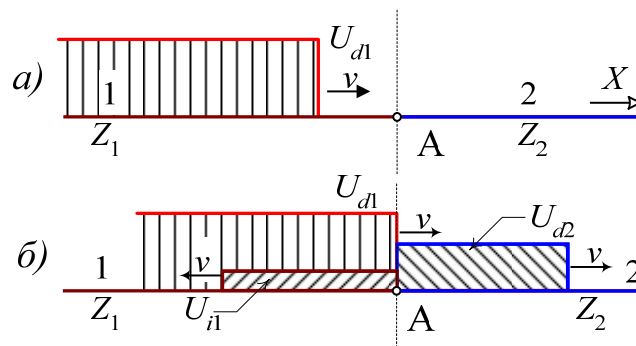
$$Z_{vl} = Z_C. \quad (4.28)$$

Тоа значи дека секој "бесконечно" долг вод може да се претстави со една активна отпорност чија што вредност ќе биде еднаква на брановата импеданција на водот. Овој заклучок ќе важи и за "долгите" или "доволно долгите" водови, барем до оној момент кога бранот којшто упаднал во водот ќе стигне до неговиот крај и ќе се врати (рефлектира) назад – појава за која ќе зборуваме во следната точка.

#### 4.2.2. Коефициенти на прекршување и одбивање на брановите

Во реалните ЕЕС постојат точки на дисконтинуитет, т.е. нехомогеност на водовите по кои што се простираат брановите. Тоа се јазелните точки на системот во кои што се соединуваат поголем број водови или, пак, тоа се точки во кои што се приклучени некакви приклучни уреди (трансформатори, кондензаторски батерии, придушници и сл.). Во наредниот дел ќе бидат изведени изразите со кои ќе се вршат пресметувањата на напоните и струите во таквите точки на дисконтинуитет.

На сликата 4.7 се прикажани два идеални вода со карактеристични импеданции  $Z_1$  и  $Z_2$ . Водовите се поврзани во точката А. Нека посматраме простирање на еден единствен бран, т.е. ситуација кога по првиот вод со импеданција  $Z_1$  наидува правоаголен напонски бран (бран кој што може да се претстави со отскочна – хевисајдова функција)  $U_{d1}(t) = U_{d1} \cdot h(t)$ . (слика 4.7).



Слика 4.7. Прекршување и одбивање на патувачките бранови

Кога упадниот бран ќе дојде до точката на дисконтинуитет А, дел од бранот ќе продолжи да се простира по водот 2, компонента која што ќе ја нарекуваме *прекршен бран*, а останатиот дел од бранот се одбие од точката А – компонента која ќе ја нарекуваме *одбиен или рефлектиран бран*.

Нека со  $Z_1$ ,  $U_1$ ,  $U_{d1}$  и  $I_{d1}$  ги означиме електричните величини придружени за водот 1. Слично, со  $Z_2$ ,  $U_2$ ,  $U_{d2}$  и  $I_{d2}$  ќе ги означиме електричните величини придружени за водот 2. Тогаш, во согласност со погоре изложеното, ќе важат следните релации:

$$I_{d1} = \frac{U_{d1}}{Z_1}, \quad I_{d2} = \frac{U_{d2}}{Z_2} \quad (4.29)$$

Наидувањето на упадниот бран  $U_{d1}$  на точката на дисконтинуитет А ќе генерира уште еден бран (рефлектиран од точката А),  $U_{r1}$ , кој што ќе се простира во инверзна насока. На тој начин напонот  $U_1$  во било која точка на водот 1 ќе биде збир од овие два брана, т.е.:

$$U_1 = U_{d1} + U_{r1}. \quad (4.30)$$

Резултантната струја  $I_1$  во било која точка на водот 1, во согласност со (4.23) и (4.24), ќе биде:

$$I_1 = I_{d1} + I_{r1}. \quad (4.31)$$

Бидејќи на водот 2 ќе постои бран кој што се воспоставил со прекршувањето во точката А, тогаш напонот  $U_2$  во било која точка 2 на овој вод ќе биде еднаков на прекршениот бран којшто се простира во директна насока:

$$U_2 = U_{d2} + U_{i2} = U_{d2} + 0 \quad (U_{i2} = 0). \quad (4.32)$$

Слично, за струјата  $I_2$  се добива:

$$I_2 = I_{d2} + I_{i2} = I_{d2} + 0; \quad (I_{i2} = -U_{i2} / Z_2 = 0). \quad (4.33)$$

Бидејќи точката А е заедничка за обата вода, по законот за континуитет ќе мора напоните и струите непосредно лево и десно од оваа точка да бидат исти. На тој начин, врз основа на условот

$$U_1 = U_2$$

за напонот во точката А, од релациите (4.30) и (4.32) се добива равенката (4.34):

$$U_{d1} + U_{i1} = U_{d2}. \quad (4.34)$$

Слично, тргнувајќи од условот за струјата во точката А лево и десно,  $I_1 = I_2$ , врз основа на релациите (4.31) и (4.33) се добива равенката (4.35):

$$\frac{U_{d1}}{Z_1} - \frac{U_{i1}}{Z_1} = \frac{U_{d2}}{Z_2}. \quad (4.35)$$

На тој начин со релациите (4.35) и (4.36) се формира систем од две линеарни равенки со две непознати. Непознатите во тој систем се директната компонента на напонот на водот 2  $U_{d2}$ , којашто е всушност компонентата на прекршениот бран (бранот што продолжува да се простира по водот 2) и инверзната компонента на напонот на водот 1,  $U_{i1}$ , а тоа е всушност рефлектираниот бран, т.е. бранот што се одбил од точката А и започнал да се простира по водот 1 во инверзна насока – од десно налево. Величината  $U_{d1}$  што фигурира во овој систем е упадниот бран кој што се смета за познат. Освен тоа позната е и вредноста на директниот бран на струјата  $I_{d1} = U_{d1}/Z_1$ .

Решението на споменатиот систем равенки гласи:

$$U_{d2} = \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2} \cdot U_{d1}. \quad (4.36)$$

$$U_{i1} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} \cdot U_{d1}. \quad (4.37)$$

Понатаму, врз основа на релациите (4.20) и (4.21), за струјните бранови  $I_{d2}$  и  $I_{i1}$  се добива:

$$I_{d2} = \frac{U_{d2}}{Z_2} = \frac{1}{Z_2} \cdot \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2} \cdot U_{d1} = \frac{2Z_1}{Z_1 + Z_2} \cdot I_{d1} \quad (4.38)$$

$$I_{i1} = -\frac{U_{i1}}{Z_1} = \frac{-1}{Z_1} \cdot \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} \cdot U_{d1} = \frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2} \cdot I_{d1}. \quad (4.39)$$

За останатите, инверзни, бранови  $U_{i2}$  и  $I_{i2}$ , веќе беше кажано дека важи  $U_{i2} = I_{i2} = 0$ .

Директната компонента на напонот што се простира по водот 2,  $U_{d2}$ , е всушност прекршениот бран, кој претставува дел од упадниот бран  $U_{d1}$ . Од релацијата (4.36) се гледа дека прекршениот бран може да се добие така што упадниот бран  $U_{d1}$  ќе се помножи со еден коефициент  $\alpha_{1A}$ :

$$U_{d2} = \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2} \cdot U_{d1} = \alpha_{1A} \cdot U_{d1}. \quad (4.40)$$

$$\alpha_{1A} = \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2}. \quad (4.41)$$

Во (4.41) со  $\alpha_{1A}$  е означен т.н. "коэффициент на прекршување" за напонскиот бран кој што се простира по водот 1 кон точката на дисконтинуитет А.

Инверзната компонента на напонот по водот 1,  $U_{i1}$ , е всушност одбиениот бран од точката А. Тој може да се изрази на следниот начин:

$$U_{i1} = \beta_{1A} \cdot U_{d1}; \quad (4.42)$$

$$\beta_{1A} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2}. \quad (4.43)$$

Величината  $\beta_{1A}$  што фигурира во последната релација е т.н. "коэффициент на одбивање" (или коэффициент на рефлексја) за напонскиот бран кој што наидува по водот 1 и удира во точката А.

На сличен начин може да се пресметаат и коефициентите на прекршување и одбивање на струјните бранови. Нив ќе ги бележиме со  $\alpha_I$  и  $\beta_I$ . Така, на пример, врз основа на изразот (4.39), за коефициентот на прекршување на струјниот бран  $\alpha_{I,1A}$  што наидува на точката А по водот 1, се добива:

$$I_{i1} = \frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2} \cdot I_{d1} = \beta_{I,1A} \cdot I_{d1}; \quad (4.44)$$

$$\beta_{I,1A} = \frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2}. \quad (4.45a)$$

Слично, врз основа на релацијата (4.38) добиваме:

$$I_{d2} = \frac{2Z_1}{Z_1 + Z_2} \cdot I_{d1} = \alpha_{I,1A} \cdot I_{d1} \quad \Rightarrow \quad \alpha_{I,1A} = \frac{2Z_1}{Z_1 + Z_2}. \quad (4.45b)$$

Лесно може да се покаже дека помеѓу коефициентите  $\alpha_{1A}$  и  $\beta_{1A}$  за прекршување и одбивање на напонските бранови важи релацијата:

$$\alpha_{1A} - \beta_{1A} = 1. \quad (4.46)$$

Постои слична релација и помеѓу коефициентите  $\alpha_{I,1A}$  и  $\beta_{I,1A}$  за прекршување и одбивање на струјните бранови:

$$\alpha_{I,1A} - \beta_{I,1A} = 1. \quad (4.47)$$

### 4.2.3. Специјални случаи на прекршување и одбивање на брановите

Ќе ги изведеме изразите за пресметување на коефициентите на прекршување и одбивање на брановите за некои специјални случаи кои се чести во практиката.

#### а) Отворен вод (вод со отворен крај)

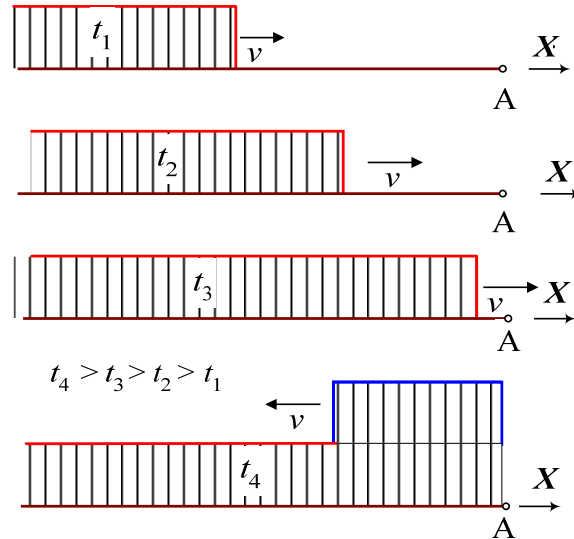
Кога бранот ќе наиде на отворен крај на вод, процесот може да се замисли дека тој ќе продолжи да тече како и во претходниот случај со таа разлика што сега упадниот бран ќе продолжи да се движи по вод со бесконечно голема бранова импеданција ( $Z_2 = \infty$ ). Имајќи ги предвид претходно изведените изрази за коефициентите на прекршување и одбивање на напонските бранови, во случајов ќе добиеме:

$$\alpha_{1A} = \lim_{Z_2 \rightarrow \infty} \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2} = 2. \quad (4.48)$$

$$\beta_{1A} = \lim_{Z_2 \rightarrow \infty} \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} = 1. \quad (4.49)$$

На сличен начин се добиваат и коефициентите на прекршување и одбивање за струјните бранови:

$$\alpha_{I,1A} = 0; \quad \beta_{I,1A} = -1. \quad (4.50)$$



**Слика 4.8. Просторен распоред на напонот долж водот 1 при упад на бран и неговото одбивање**

Одбиениот бран кој што ќе се простира по водот 1 во инверзна насока, од точката А налево, во овој случај ќе биде:

$$U_{i1} = \beta_{1A} \cdot U_{d1} = U_{d1}, \quad (4.51)$$

додека напонот во точката А и во било која друга точка на водот 1 ќе биде збир од упадниот бран  $U_{d1}$  и одбиениот бран  $U_{i1}$ , т.е.:

$$U_A = U_{d1} + U_{i1} = 2U_{d1}. \quad (4.52)$$

Значи, напонот на крајот од отворениот вод ќе се зголеми за два пати (ќе се дуплира), т.е. ќе има вредност која ќе биде двојно поголема од вредноста на упадниот бран. Тоа дуплирање на напонот на водот 1 се појавува најнапред на неговиот крај, а потоа постепено се шири влево, со брзината со која одбиениот бран се простира по водот 1 во инверзна насока. Оваа појава, посматрана во неколку различни моменти на време, е прикажана на сликата 4.8.

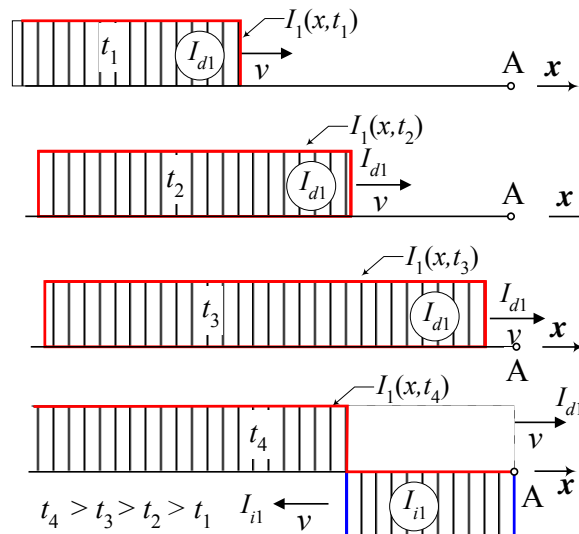
Заедно со напонските бранови, по водовите 1 и 2 се движат и струјните бранови. Притоа имаме:

$$I_{d1} = \frac{U_{d1}}{Z_1}; \quad I_{i1} = -\frac{U_{i1}}{Z_1} = -\frac{U_{d1}}{Z_1} = -I_{d1}; \quad (4.53)$$

$$I_A = I_{d1} + I_{i1} = 0.$$

Значи одбиениот струен бран  $I_{i1}$  има инверзна насока на движење поради што тој ќе има негативна вредност. Со неговото простирање во насока на смалување на координатата  $x$  тој ќе се суперпонира со позитивниот упаден струен бран  $I_{d1}$  и на тој начин тие два брана се поништуваат. Како резултат на тоа се добива дека на оние делови од водот 1 каде што доаѓа до нивно преклопување струјата во спроводникот е нула, како што е тоа видно од сл. 4.9.

Удвојувањето на напонот на крајот на водот при одбивањето на упадниот бран од отворениот крај на водот може да се протумачи со претворањето на електромагнетската енергија, акумулирана во елементарните индуктивности на водот, во електростатичка енергија што се складира во неговите елементарни капацитети, според сликата 4.10.



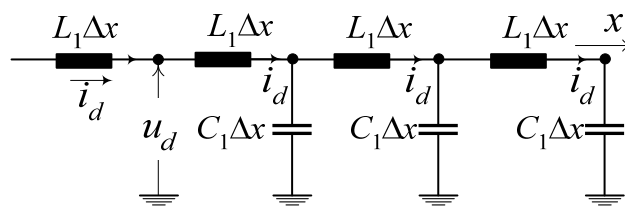
**Слика 4.9. Просторен распоред на струјата долж водот при упад на бран по отворен вод**

Простирањето на брановите по еден вод може да се објасни на следниот начин. Со течењето на струјата на упадниот бран  $i_d = i_d(t)$  низ елементарниот индуктивитет  $L_1 \cdot \Delta x$  се полни елементарниот капацитет  $C_1 \cdot \Delta x$ . Штом ќе се подигне напонот на капацитетот  $C_1 \cdot \Delta x$  ќе се појави напон на краевите на следниот, десно од него, елементарен индуктивитет  $L_1 \cdot \Delta x$ , а тоа ќе предизвика течење на струја низ него. Таа струја ќе почне да го полни следниот елементарен капацитет  $C_1 \cdot \Delta x$ , во наредната секција, итн.

Електромагнетската енергија во елементарниот индуктивитет  $L_1 \cdot \Delta x$ , има вредност:

$$W_L = L_1 \cdot \Delta x \cdot i_d^2 / 2$$

(слика 4.10), додека електростатичката енергија акумулирана во елементарниот капацитет  $C_1 \cdot \Delta x$  има вредност  $W_C = C_1 \cdot \Delta x \cdot u_d^2 / 2$ . Во исто време помеѓу напонот  $u_d$  и струјата  $i_d$  на бранот што се простира важи релацијата:  $u_d = Z_C \cdot i_d$ .



**Слика 4.10. Објаснување на тоталната рефлексija на брановите од отворениот крај на водот со Законот за одржување на енергијата**

Во било која точка од водот овие две енергии меѓу себе еднакви, т.е.  $W_L = W_C$ . Тоа може да се докаже многу едноставно ако се земе предвид последната релација помеѓу брановите  $u_d$  и  $i_d$  и тоа се замени во изразите за енергиите  $W_L$  и  $W_C$ :

$$W_C = C_1 \cdot \Delta x \cdot \frac{u_d^2}{2} = C_1 \cdot \Delta x \cdot \frac{Z_C^2 \cdot i_d^2}{2};$$

$$Z_C^2 = \frac{L_1}{C_1} \Rightarrow W_C = L_1 \cdot \Delta x \cdot \frac{i_d^2}{2} \equiv W_L$$

Од изложеното може да се заклучи дека напонскиот и струјниот бран се простираат долж водот во директна насока предизвикувајќи течење на струјата  $i_d$  низ елементарните индуктивности. Таа струја, пак, ги полни елементарните капацитивности и ги набива со напонот  $u_d = Z_C \cdot i_d$ . На тој начин се докажа и фактот дека во процесот на простирање на електромагнетните бранови по должината на водовите магнетската енергија  $W_L$  што ја содржи струјниот бран се претвора во електростатичка енергија  $W_C$  на напонскиот бран – и обратно. Значи простирањето на брановите е процес на наизменично претворање на магнетска енергија во електростатичка – и обратно.

Во моментот кога бранот ќе стигне до крајот на водот и се наполни и последниот елементарен капацитет  $C_1 \cdot \Delta x$ , веќе нема можност тој да се празни во наредната секција. Со тоа комплетната електромагнетска енергија  $W_L$  на елементарниот индуктивитет ќе се претвори во електростатичка енергија  $W_C$  предизвикувајќи пораст на напонот на крајот на двојна вредност. Струјата низ последниот елементарен индуктивитет престанува да тече а струјата низ елементарните индуктивитети од претходните секции која сè уште пристига, сега ги дополнува елементарните капацитети лево од последната секција предизвикувајќи удвојување на нивниот напон. На тој начин струјата низ елементарните индуктивитети на водот, гледано од десно кон лево, постепено се гаси додека напоните на елементарните капацитети, гледано исто така од десно кон лево, се зголемува до двојната вредност од напонот што би го имале кога не би постоел дисконтинуитетот на крајот од водот.

#### б) Вод заземјен на својот крај (кусо споен вод)

И во овој случај проблемот може да се реши со помош на општиот модел од точката 4.2.2, прикажан на сл. 4.7 со таа разлика што сега ќе биде  $Z_2 = 0$ . Во случајов, врз основа на релациите (4.40) ÷ (4.47), за коефициентите на прекршување и одбивање на брановите ќе добиеме:

$$\alpha_{1A} = 0; \quad \beta_{1A} = -1, \quad (4.53)$$

$$\alpha_{L1A} = 2; \quad \beta_{L1A} = 1. \quad (4.54)$$

Значи во овој случај рефлектираниот бран е со иста амплитуда како и упадниот но со обратен поларитет, т.е. негативен:

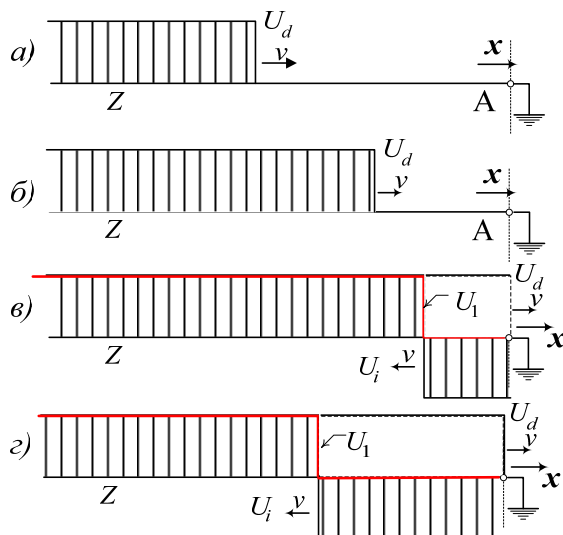
$$U_{1i} = \alpha_{1A} \cdot U_{1d} = -U_{1d}. \quad (4.55)$$

Тоа ќе го поништи упадниот бран така што напонот во точката А, како и напонот по водот 1, кој претставува збир од упадниот и одбиениот бран, ќе има вредност 0:

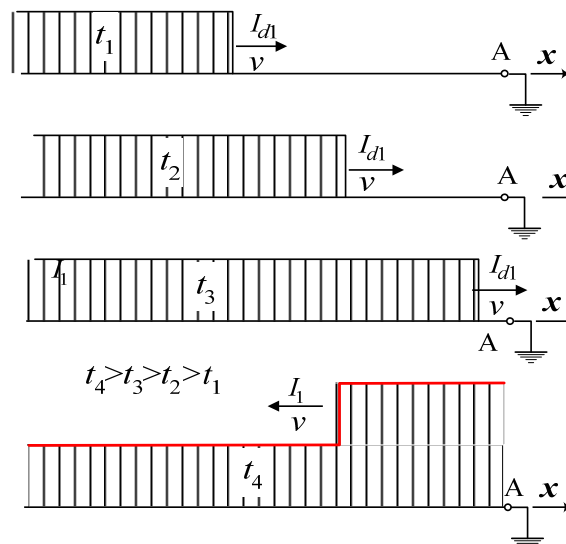
$$U_1 = U_{d1} + U_{i1} = 0. \quad (4.56)$$

Ова поништување на напонот на водот 1 се одвива постепено, со напредувањето на инверзниот (одбиениот) бран наназад, од крајот на водот 1 кон неговиот почеток, како што е тоа прикажано на сликата 4.11 (дел в и г).





Слика 4.11. Одбивање на упадниот напонски бран кај вод заземјен на крајот



Слика 4.12. Просторен распоред на струјата по должина водот по неговото одбивање

Од релацијата (4.54) следи дека одбиениот струен бран е еднаков со упадниот, т.е.:

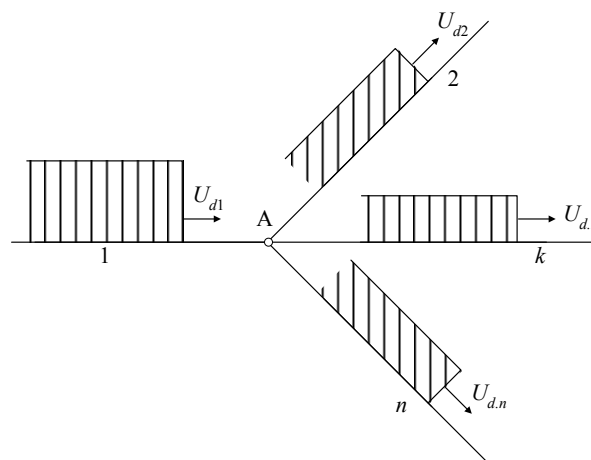
$$I_{d1} = I_{i1}, \quad (4.57)$$

$$I_A = I_{d1} + I_{i1} = 2I_{d1}. \quad (4.58)$$

Значи одбиениот струен бран се суперпонира со упадниот и на тој начин струјата  $I$  на водот станува двојно поголема. Ова удвојување на струјата, слично како и во случајот со удвојувањето на напонот по должината на водот во претходниот случај (слика 4.8) се одвива постепено, простирајќи се заедно со одбиениот струен бран  $I_{i1}$ , во инверзна насока – оддесно налево, како што е тоа прикажано на сликата 4.12. Притоа удвојувањето на струјата на заземјениот крај на водот може да се тумачи како претворање на електростатичката енергија на елементарните капацитети во електромагнетна енергија во елементарните индуктивности, аналогно на процесите при простирањето на брановите по вод отворен на крајот.

### в) Случај кога упадниот бран наидува на точка на раздел со поголем број водови

Овој случај, кој што е исто така чест во практиката, е прикажан на сликата 4.13. Нека напонскиот бран со амплитуда  $U_d = U_{d1}$ , се простира во директна насока по водот 1 со бранова импеданција  $Z_1$ , и наидува на разделна точка А во која се приклучени поголем број водови – вкупно  $n-1$ , што заедно со водот 1 по кој наидува упадниот бран дава вкупно  $n$  водови. Во тој случај поради дисконтинуитетот на кој што наидува упадниот бран, ќе дојде до негово прекршување и одбивање. Притоа по секој од  $n-1$  водови ќе продолжи да се простира идентичен прекршен напонски бран. Овој случај е прикажан на сликата 4.13.



Слика 4.13. Упадн напонски бран наидува

## на точка на гранење со повеќе водови

Заради упростување на анализите ќе претпоставиме дека сите водови имаат исти карактеристични импеданции:

$$Z_1 = Z_2 = Z_3 = \dots = Z_n = Z.$$

Во тој случај и прекршените бранови што продолжуваат да се движат по преостанатите водови во директна насока, од точката А кон нивниот крај, ќе имаат иста вредност:

$$U_{d,k} = \alpha_{1A} \cdot U_{d1} = \alpha_{1A} \cdot U_{up}; \quad k = 2, 3, \dots, n., \quad (4.59)$$

Во релацијата (4.59) со  $U_{up} = U_{d1}$  е означен директниот, т.е. упадниот, бран што наидува по водот 1 и упаѓа во јазелната точка А. Со  $U_{d,k}$ ; ( $k = 2, 3, \dots, n$ ) се означени прекршените бранови кои продолжуваат да се простираат по преостанатите  $n-1$  водови во директна насока. Така, на пример,  $U_{d,2}$  е прекршениот бран кој се формирал на водот бр. 2 со упаѓањето на упадниот бран  $U_{up}$  во точката А и продолжува да се движи по истиот вод во директна насока, како што е тоа прикажано на сликата 4.13.

Коефициентот на прекршување на напонскиот бран којшто по водот 1 наидува према точката А,  $\alpha_{1A}$ , има вредност:

$$\alpha_{1A} = \frac{2 \cdot Z_{ek}}{Z_{ek} + Z}. \quad (4.60)$$

Во релацијата (4.60) со  $Z_{ek}$  е означена еквивалентната карактеристична импеданција на сите преостанати  $n-1$  водови на кои наидува упадниот бран. Со оглед на тоа дека сите тие водови, во разгледуваниот случај, имаат исти карактеристики, следува:

$$Z_{ek} = \frac{Z}{n-1}. \quad (4.61)$$

По замената на (4.61) во (4.60) се добива:

$$\alpha_{1A} = \frac{2 \cdot Z_{ek}}{Z_{ek} + Z} = \frac{2Z/(n-1)}{Z/(n-1) + Z} = \frac{2}{n}. \quad (4.62)$$

Одбиената компонента на напонот од јазелот А што се простира во инверзна насока по водот 1  $U_{i1} = U_{od,1}$ , ќе биде:

$$U_{od,1} = \beta_{1A} \cdot U_{up}. \quad (4.63)$$

$$\beta_{1A} = \frac{Z_{ek} - Z}{Z_{ek} + Z} = \frac{2-n}{n}. \quad (4.64)$$

Напонот  $U_A$  во точката А ќе го пресметаме како збир од упадниот и одбиениот бран, т.е.:

$$U_A = U_{d1} + U_{i1} = U_{up} + \beta_{1A} \cdot U_{up} = (1 + \beta_{1A}) \cdot U_{up}. \quad (4.65)$$

или, со оглед на (4.64), се добива следниот резултат:

$$U_A = \left(1 + \frac{2-n}{n}\right) \cdot U_{up} = \frac{2}{n} \cdot U_{up}. \quad (4.66)$$

Струјата  $I_1$  што ќе тече во првиот вод ќе биде:

$$\begin{aligned} I_1 &= I_{d1} - I_{i1} = \frac{U_{d1} - U_{i1}}{Z} = \frac{U_{up} - \beta_{1A} \cdot U_{up}}{Z} = \\ &= \frac{(1 - \beta_{1A})}{Z} \cdot U_{up} = \frac{(2 - \alpha_{1A}) \cdot U_{up}}{Z} \end{aligned} \quad (4.67)$$

$$I_1 = \left(2 - \frac{2}{n}\right) \cdot \frac{U_{up}}{Z} = 2 \cdot \frac{n-1}{n} \cdot \frac{U_{up}}{Z}. \quad (4.68)$$

Струите  $I_k$  по преостанатите водови ќе ги добиеме како однос на прекршените бранови и соодветните импеданции на тие водови. Во случајот ќе имаме:

$$I_k = I_{d.k} = \frac{U_{d.k}}{Z} = \alpha_{1A} \cdot \frac{U_{up}}{Z} = \frac{2}{n} \cdot \frac{U_{up}}{Z}; \quad k = 2, 3, \dots, n. \quad (4.69)$$

#### 4.2.4. Еквивалентен бран

Решавањето на брановите преодни процеси во сложените електрични кола при упад на пренапонски бран од атмосферско потекло, во општ случај, се решаваат со помош на општи модели. Во оваа точка ќе биде изложен еден таков општ модел. Тој се однесува на било кој јазел од едно сложено електрично коло што е предмет на анализа.

Ќе набљудуваме општ случај кога посматраниот јазел А е поврзан, во исто време, со  $n$  приклучни водови упаѓаат  $n$  напонски бранови. Истовремено во посматраниот јазел е приклучен елемент, во општ случај нелинеарен, за кој што е позната "волт-амперната" карактеристика, т.е. зависноста  $u = f(i)$  (слика 4.14). На сликата 4.14 тој елемент е прикажан со својата операторска импеданција  $Z(p)$ . Тоа може да биде некој друг вод, некаков нелинеарен отпорник (нпр. "одводник на пренапони"), реактивен елемент (индуктивитет, капацитет) и др.

На сликата 4.14 се воведени следните означувања:

$U_{up.k}$  – упаден бран по водот  $k$ , т.е. бран којшто се движи по  $k$ -тиот вод и упаѓа во точката А;

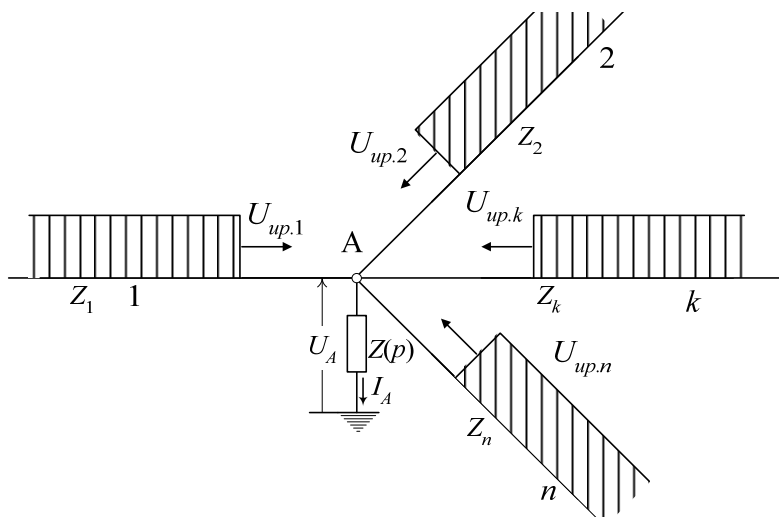
$U_A, I_A$  – вредности на напонот и струјата во елементот приклучен во посматраната точка А;

$Z(p)$  – лапласова трансформација од импеданцијата на приклучениот елемент.

Може да се покаже дека приликите во точката А од прикажаното коло може да се пресметаат со помош на следните изрази:

$$U_A + Z_{ek} \cdot I_A = E_{ek} \quad (4.70)$$

каде што се:

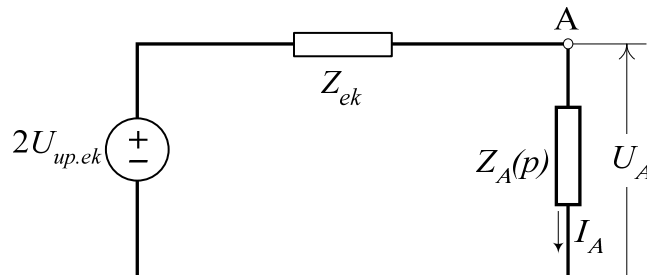


Слика 4.14. Општ случај кога повеќе упадни бранови наидуваат на точка на гранење со повеќе водови

$$Z_{ek} = Z_1 \parallel Z_2 \parallel \dots \parallel Z_n = 1 / \sum_{k=1}^n (1/Z_k) \quad (4.71)$$

$$E_{ek} = 2 \cdot U_{up,ek} = 2 \cdot Z_{ek} \cdot \sum_{k=1}^n \frac{U_{up,k}}{Z_k}. \quad (4.72)$$

На овие изрази соодветствува еквивалентното коло прикажано на сликата 4.15.



**Слика 4.15. Заменска шема за пресметка на приликите  $U_A$  и  $I_A$  во точката А**

Во оваа шема останатиот дел од колото е еквивалентиран со еден напонски генератор чија што внатрешна импеданција е еднаква на вредноста  $Z_{ek}$ , дефинирана со (4.71) додека неговата е.м. сила е еднаква на двојната вредност од еквивалентниот упаден напонски бран, дефинирана со (4.72).

Врз основа на шемата од сл. 4.15 може да се пресметаат вредностите  $U_A(p)$  и  $I_A(p)$  во лапласов домен а потоа и бараните моментни вредности на напонот и струјата  $u_A(t)$  и  $i_A(t)$  во точката А:

$$U_A(p) = \frac{Z_A(p)}{Z_A(p) + Z_{ek}} \cdot E_{ek}(p) = \frac{Z_A(p)}{Z_A(p) + Z_{ek}} \cdot 2U_{up,ek}(p), \quad (4.73)$$

$$I_A(p) = \frac{E_{ek}(p)}{Z_A(p) + Z_{ek}} = \frac{2U_{up,ek}(p)}{Z_A(p) + Z_{ek}}. \quad (4.74)$$

Врз основа на шемата од сл. 4.15 и релациите (4.70) .. (4.74) е можно бараните временски функции  $u_A(t)$  и  $i_A(t)$  да се пресметаат со помош на постапки што се применуваат при решавањето на електричните кола со концентрирани параметри.

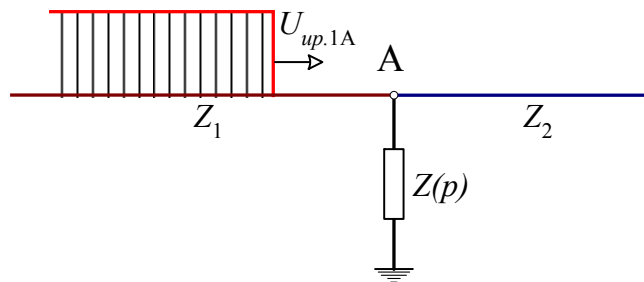
### 4.3. ПЕТЕРСЕНОВО ПРАВИЛО

За пресметување на брановите преодни процеси при упад на пренапонски бран во електричните кола во кои покрај водовите, коишто претставуваат елементи со распределени параметри и кај кои се присутни ефектите на простирање на брановите, се среќаваат и елементи со концентрирани параметри, се применува постапка наречена "*Петерсеново правило*".

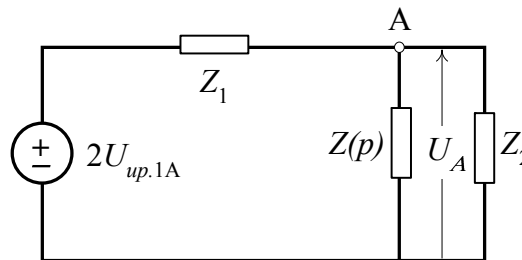
Според неа сите водови се заменуваат со концентрирани активни отпори чија отпорност е бројно еднаква на нивната карактеристична, т.е. бранова, импеданција. Водот по којшто наидува пренапонскиот бран или "еквивалентниот вод" (сл. 4.15) по којшто наидува еквивалентниот бран се моделираат со напонски генератор. Неговата електромоторна сила, во согласност со изложеното во претходната точка, има двојно поголема вредност од вредноста на упадниот бран. Внатрешната отпорност на напонскиот генератор е еднаква на карактеристичната импеданција на водот по којшто наидува (упаѓа) и се простира бранот што го предизвикува преодниот процес. Концентрираните елементи во посматраното коло се

претставуваат со своите операторски импеданции а така добиената заменска шема на анализираното коло се нарекува *Петерсенова шема* (коло).

На сликата 4.16 е прикажана Петерсеновата шема што се добива во случајот кога пренапонски бран  $U_{up}$ , којшто наидува по вод со карактеристична импеданција  $Z_1$ , упаѓа во разделната точка А во која што е паралелно према земја приклучена операторска импеданција  $Z(p)$ . На сликата 4.17, пак, е прикажана Петерсеновата шема за случајот разгледуван на претходната слика. Водот по којшто наидува пренапонскиот бран е заменет со отпорникот  $Z_1$  додека самиот пренапонски бран е заменет со емс  $E = 2U_{up}$ . Бесконечно долгиот вод со импеданција  $Z_2$  на којшто упадниот бран се прекршува и по кој понатаму продолжува да се простира е на оваа слика прикажан со отпорникот  $Z_2$  врзан паралелно помеѓу точката А и земјата.



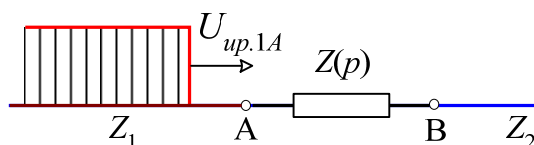
Слика 4.16. Заменска шема за пресметка на преодните процеси при удар на бран во точката А



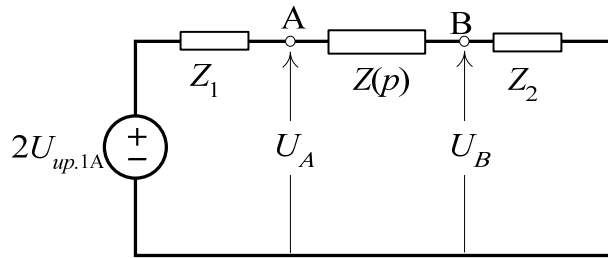
Слика 4.17. Примена на Петерсеново правило и формирање на Петерсеновата шема

Сега, со помош на колото од сликата 4.17, може да се пресметаат временските текови  $u_A(t)$  и  $i_A(t)$  на напонот  $U_A$  во разделната точка А и струјата  $I_A$  низ елементот со операторска импеданција  $Z(p)$ . Во попростите случаи, кога шемата е едноставна, таа пресметка се врши најнапред во Лапласовиот домен и подоцна со примена на инверзната Лапласова трансформација. Но кога шемата е посложена решавањето на преодниот процес во колото обично се решава со готова компјутерска програма која всушност врши нумеричко решавање на интегро-диференцијалните равенки што произлегуваат од Кирхофовите закони со коишто се опишуваат приликите во колото.

Петерсеновото правило може да се применува и во случаите кога концентрираниот елемент со операторска импеданција  $Z(p)$  е приклучен редно, во серија со два доволно долги вода, како што е тоа случајот прикажан на сликата 4.18. Петерсеновата шема за овој случај е прикажана на сликата 4.19.



Слика 4.18. Упад на бран во коло со редно приклучен елемент со операторска импеданција  $Z(p)$



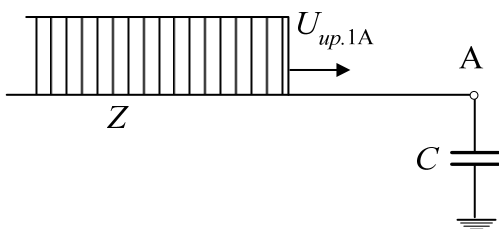
Слика 4.19. Петерсенова шема за случајот со редно приклучен елемент, прикажан на сл. 4.18

Примената на Петерсеновото правило во натамошниот дел од текстот ќе биде илустрирано не некои прости, практични, примери.

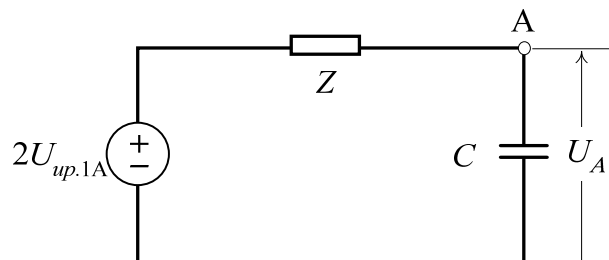
#### 4.3.1. Кондензатор приклучен паралелно на крајот од водот

Енергетските трансформатори претставуваат сложени електрични кола. Нивните намотки можат да се прикажат како каскада од голем број редно-паралелно поврзани индуктивности (на одделните навивки од намотката) и капацитивности со кои се претставува капацитивноста помеѓу навивките и капацитивностите на секоја навивка кон земјата (куќиштето на трансформаторот). Во првите неколку десетини  $\mu s$  од преодниот процес, којшто има бранов карактер, индуктивитетите од заменската шема, поради својата магнетска инерција, не учествуваат во самиот преоден процес и трансформаторот може да се претстави само со својот "влезен" капацитет на намотката. Таквата заменска шема е сосема едноставна но е во исто време и доволно точна за успешна проценка на загрозеноста на изолацијата на трансформаторот од атмосферските пренапони, барем за почетокот од преодниот процес. Слободно може да се каже дека истата логика се однесува и на останатите мерни трансформатори (струјни и напонски).

За илустрација на влијанието на влезниот капацитет на намотките на трансформаторот врз деформацијата на обликот на упадниот бран од атмосферско потекло ќе го посматраме случајот прикажан на сликата 4.20. По вод со карактеристична импеданција  $Z_1$  наидува пренапонски бран со правоаголно чело и со амплитуда  $U_{up,1A}$  а на крајот од водот е прилучен трансформатор којшто во еквивалентната шема се заменува со паралелен кондензатор  $C$ , како на сликата 4.20. Во тој случај со примена на Петерсеновото правило е можно да се формира Петерсеновата заменска шема со концентрирани елементи со помош на која ќе може да се изврши пресметка на временскиот тек на напонот на трансформаторот  $u_A(t)$ . Оваа шема е прикажана на сликата 4.21.



Слика 4.20. Упад на бран со правоаголно чело по вод на кондензатор



Слика 4.21. Петерсенова шема на водот со кондензатор на неговиот крај

Врз основа на шемата од сликата 4.21 ќе го одредиме напонот на кондензаторот  $C$ , најнапред во операторски облик,  $U_A(p)$ , а потоа и во временски домен,  $U_A(t)$ . Ако со  $U_m = U_{up.1A}$  ја означиме амплитудата на упадниот бран, тогаш врз основа на сликата 4.21 можеме да пишуваме:

$$U_A(p) = \frac{Z_A(p)}{Z_A(p) + Z} \cdot 2U_{up.1A}(p) = \frac{1/pC}{1/pC + Z} \cdot \frac{2U_m}{p} = \frac{2U_m}{p \cdot (1 + ZCp)}. \quad (4.75)$$

Со примена на инверзната Лапласова трансформација на изразот од (4.75) се добива решението за напонот  $U_A$  во временски домен:

$$U_A(t) = 2U_m \cdot (1 - e^{-t/T}) \cdot h(t). \quad (4.76)$$

каде што со  $h(t)$  е означена единечната отскочна функција која покажува дека за  $t < 0$  напонот на кондензаторот бил еднаков на нула, додека со  $T = Z \cdot C$  е означена временската константа на анализираното коло.

Одбиениот бран  $U_{od.1A}$  од точката А кој се враќа назад по водот ќе биде:

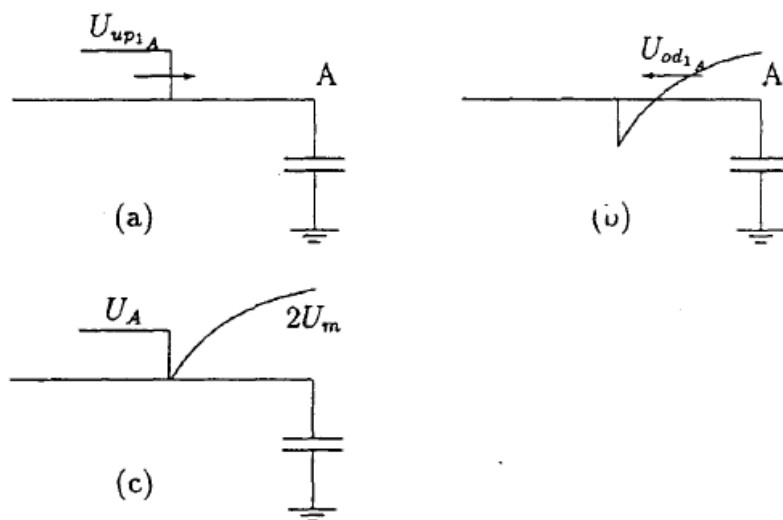
$$U_{od.1A}(t) = U_A(t) - U_{up.1A}(t), \text{ или} \quad (4.77)$$

$$U_{od.1A}(t) = U_m \cdot (1 - 2 \cdot e^{-t/T}) \cdot h(t). \quad (4.78)$$

На сликата 4.22 се прикажани: а) временскиот тек на упадниот бран  $U_{up.1A}(t)$ , б) просторната распределба на одбиениот бран  $U_{od.1A}$  и с) просторната распределба на напонот долж водот.

Од сликата 4.22 може да се констатира дека кондензаторот со своето присуство го деформира упадниот бран т.е. да ја смалува неговата стрмина. Во првиот момент, веднаш по упадот на бранот капацитетот  $C$  се владее како место на куса врска, се додека не се наполни, поради што во првите моменти по наидувањето на бранот, напонот на кондензаторот е практично еднаков на нула. После доволно долго време (практично после  $t \geq 3T = 3 \cdot ZC$ ) завршува преодниот процес, кондензаторот ќе се наполни и од тој момент тој ќе претставува место каде што е водот отворен. Поради тоа после отприлика  $t = 3T$ , напонот на кондензаторот се дуплира (удвостручува).

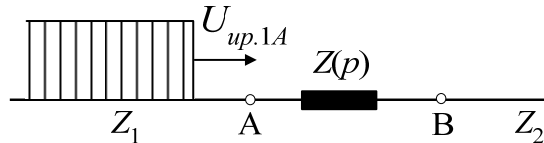
Доколку трансформаторот би имал бесконечна влезна импеданција и нулти влезен капацитет ( $C \rightarrow 0$ ) тогаш споменатата деформација на напонот би ја немало и упадот на пренапонскиот бран би предизвикал моментално удвојување на напонот  $U_A$ , што е многу опасно за подолжната изолација (изолацијата помеѓу навивките) на трансформаторот.



**Слика 4.22. Временски тек и просторна распределба на напонот при упад на бран по вод затворен со паралелно приклучен капацитет**

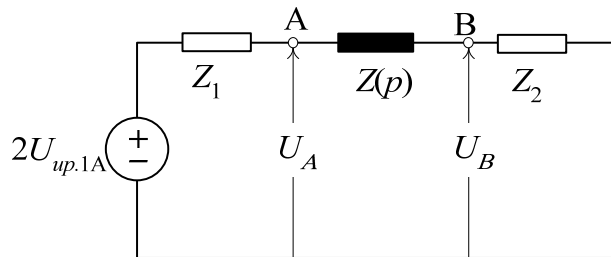
**4.3.2. Наидување на упаден бран на редно врзан индуктивитет**

Во ЕЕС се среќаваат придушници кои претставуваат редно приклучени индуктивности со задача струите на куса врска во водовите од мрежата да ги намалат на прифатливо ниво. На сликата 4.23 е прикажана редна врска на два долги вода со карактеристични импеданции  $Z_1$  и  $Z_2$  и индуктивност  $L$ , прикажана со својата операторска импеданција  $Z(p) = p \cdot L$ . Притоа по водот 1 со импеданција  $Z_1$  кон точката А се простира упаден бран со амплитуда  $U_m = U_{up.1A}$ .



**Слика 4.23. Упадн пренапонски бран наидува на редна индуктивност  $L$**

И за овој случај ќе ја формираме Петерсеновата заменска шема со концентрирани параметри (слика 4.24). Врз основа на оваа шема ќе ја определиме зависноста на напоните во точките А и В,  $U_A(t)$  и  $U_B(t)$ , пред и зад редно врзаниот индуктивитет.



**Слика 4.24. Петерсенова заменска шема за случајот на редна индуктивност  $L$**

Врз основа на заменската шема од сликата 4.24 најнапред ќе ги определиме Лапласовите трансформации  $U_A(p)$  и  $U_B(p)$  на напоните во точките А и В, а потоа и нивните временски текови  $u_A(t)$  и  $u_B(t)$ . Притоа повторно го посматраме случајот која упадниот бран има правоаголно чело, како и во претходниот случај опишан во точката 4.3.1:

$$U_A(p) = \frac{Z_2 + Z(p)}{Z_1 + Z_2 + Z(p)} \cdot \frac{2U_m}{p} = \frac{pL + Z_2}{pL + Z_1 + Z_2} \cdot \frac{2U_m}{p}, \quad (4.79)$$

$$U_B(p) = \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2 + Z(p)} \cdot \frac{2U_m}{p} = \frac{Z_2}{pL + Z_1 + Z_2} \cdot \frac{2U_m}{p}. \quad (4.80)$$

Со примена на постапката за инверзна Лапласова трансформација на изразите (4.79) и (4.80) се добиваат бараните временски текови  $u_A(t)$  и  $u_B(t)$  на напоните во точките А и В:

$$u_A(t) = \left( \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2} + \frac{2Z_1}{Z_1 + Z_2} \cdot e^{-t/T} \right) \cdot h(t), \quad (4.81)$$

$$u_B(t) = \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2} \cdot (1 - e^{-t/T}) \cdot h(t). \quad (4.82)$$



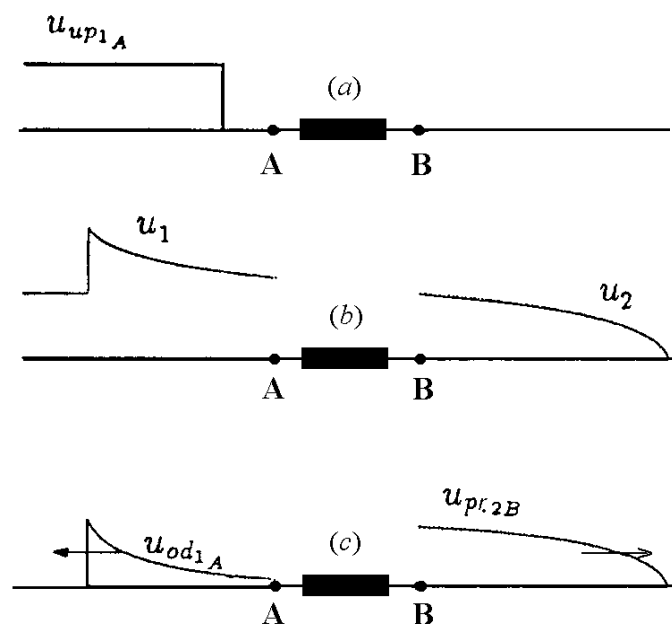
Во овој случај временската константа на колото  $T$ , која што фигурира во последните два изрази, изнесува:  $T = L/(Z_1 + Z_2)$ .

Рефлектираниот бран кој што се одбил од точката А и се враќа назад по водот 1 во инверзен правец, во овој случај ќе биде:

$$U_{od.1A}(t) = \left( \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} + \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2} \cdot e^{-t/T} \right) \cdot h(t). \quad (4.83)$$

Прекршениот бран што продолжува да се простира по водот 2 во директен правец е всушност еднаков на напонот  $U_B$  бидејќи водот 2 е доволно долг и нема рефлексии од неговиот крај.

На сликата 4.25 се прикажани: упадниот бран  $U_{up.1A}$ ; просторната распределба на напоните  $u_1(t)$  и  $u_2(t)$  долж водовите 1 и 2 и просторната распределба на бранот одбиен од точката А,  $U_{od.1A}$ , како и прекршениот бран  $U_{pr.2B}$ .



Слика 4.25. Просторна распределба на напонските бранови и напонот долж водовите 1 и 2:

а) упаден бран  $U_{up.1A}(t)$ ; б) напони на водовите 1 и 2  $U_1(t)$  и  $U_2(t)$ ; в) одбиени бранови  $U_{od}(t)$

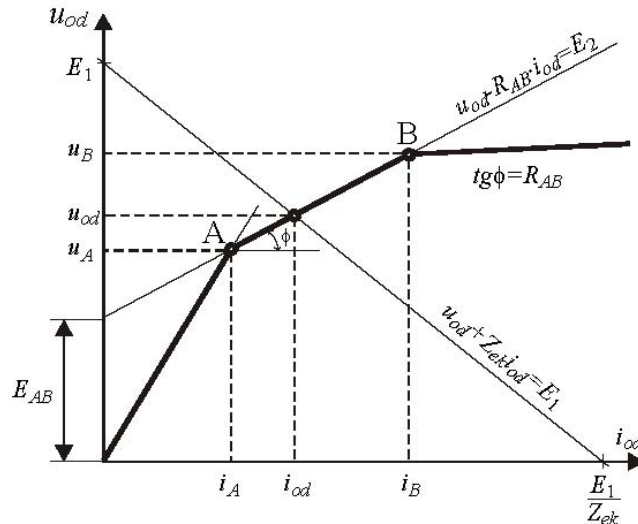
Од сликата 4.25 се забележува дека во моментот кога упадниот бран ќе најде на индуктивитетот  $L$ , напонот  $U_A$  моментално се удвојува за потоа, постепено, да се намали до вредноста која би се имала во точката А кога индуктивитетот  $L$  не би постоел. Од тие причини (удвојување на напонот) во ваквите случаи е неопходно преземање дополнителни мерки за заштита од пренапони на елементите коишто имаат голема индуктивност и во исто време имаат заменарливо мала капацитивност.

### 4.3.3. Наидување на упаден бран на нелинеарен елемент (одводник на пренапони)

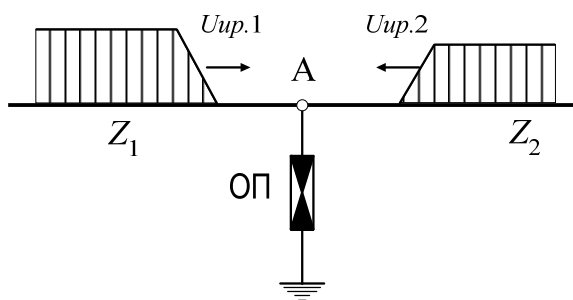
Заштитата на уредите и елементите од ЕЕС од пренапони се заснова, во основа, на примена на заштитни уреди наречени "одводници на пренапони". Одводниците на пренапони се всушност варистори, т.е. нелинеарни отпорници со силно изразена нелинеарност. Волт-амперната карактеристика на еден одводник на пренапони (ОП), како што се нарекува зависноста  $u(i)$ , може да се опише со законот  $u = k \cdot i^\alpha$ . Во нумеричките пресметки таа најчесто

се апроксимира со една искршена крива (слика 4.26), или, како што се вели, за таа цел се врши "сегментна линеаризација" на волт-амперната карактеристика на одводникот.

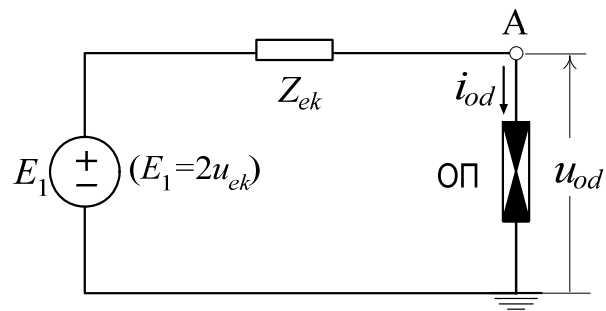
На сл. 4.27а е прикажан случај кога еквивалентниот бран упаѓа во постројка и наидува на одводник на пренапон, додека на сликата 4.27б е прикажано соодветното еквивалентно Петерсеново коло.



Слика 4.26. Нелинеарна волт-амперна карактеристика на одводник, апроксимирана со отсечки



Слика 4.27а. Упад на бран по вод на одводник на пренапони



Слика 4.27б. Петерсенова шема на водот со одводник на неговиот крај

Решавањето на приликите кај одводникот во овој случај се врши нумерички или по графички пат. Нумеричкото решавање на вредностите на непознатите напон и струја кај одводникот,  $u_{od}$  и  $i_{od}$ , се врши со помош на Петерсеновата еквивалентна шема, врз основа на која можеме да ја напишеме следните релации:

$$u_{od} + Z_{ek} \cdot i_{od} = E_1, \quad (4.84a)$$

$$u_{od} = f(i_{od}). \quad (4.84б)$$

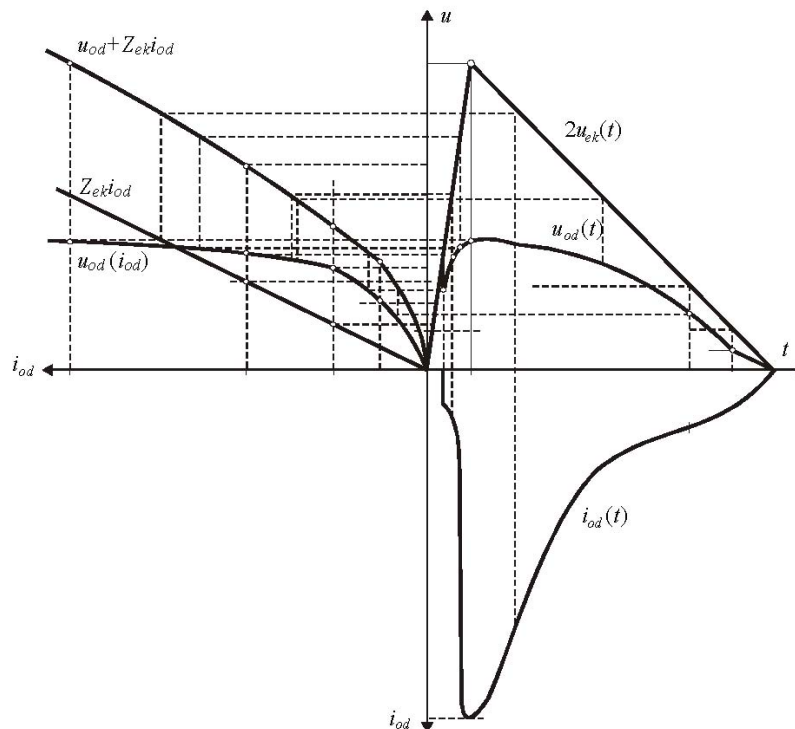
Последните релации чинат систем од две равенки (од кои едната е нелинеарна) со две непознати. Неговото решавање е наједноставно ако извршиме негова линеаризација, како што е тоа прикажано на сликата 4.26. Значи, нелинеарната волт-амперна карактеристика на одводникот ќе ја прикажеме со една линеарна релација од типот  $u_{od} = E_{AB} + R_{AB} \cdot i_{od}$  па на тој начин се добива нов, линеарен систем равенки (4.85) со чие решавање ги добиваме бараните непознати  $u_{od}$  и  $i_{od}$ .

$$\begin{aligned} u_{od} + Z_{ek} \cdot i_{od} &= E_1 \\ u_{od} &= E_{AB} + R_{AB} \cdot i_{od} \end{aligned} \quad (4.85)$$

Решението на проблемот во овој случај гласи:

$$\begin{aligned} i_{od} &= \frac{E_1 - E_{AB}}{R_{AB} + Z_{ek}} \\ u_{od} &= E_{AB} + R_{AB} \cdot \frac{E_1 - E_{AB}}{R_{AB} + Z_{ek}} \end{aligned} \quad (4.86)$$

Графичкиот начин на решавање на состојбата кај одводникот е понагледен но е, сепак, во денешно време, непрактичен. Тој е илустриран на сликата 2.28.



Слика 4.28. Графички начин на определување на напонот на одводник со искриште

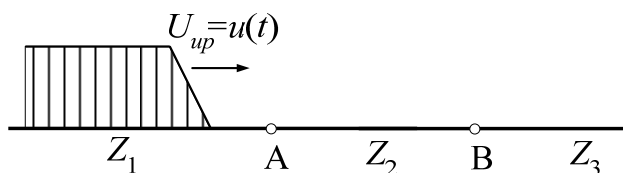
#### 4.4. МЕТОДИ ЗА ПРЕСМЕТКА НА БРАНОВИТЕ ПРОЦЕСИ НА ВОДОВИ

Во наредниот дел од текстот ќе бидат опишани некои методи кои овозможуваат решавање на брановите процеси во кола кај кои се јавуваат повеќекратни рефлексии на брановите. Повторно ќе се посматра случајот кога водовите по кои што се простираат брановите се идеални или пак за нив е исполнет хевисајдовиот услов. Со помош на овие методи е можно, во некои попусти случаи, пресметките на преодните процеси да се извршат и рачно, со некој графо-аналитички метод, но во основа тие се повеќе наменети за примена на некои нумерички, компјутерски ориентирани, постапки кај кои пресметките се вршат со компјутерска програма.

##### 4.4.1. Метод на мрежен дијаграм

Овој метод, за прв пат воведен од Бјули (Bewley) бил применуван во времињата кога компјутерите сè уште не биле воведени во инженерската практика бидејќи тој нуди постапка која овозможува прегледно и едноставно пратење на движењето на брановите во сложените

кола, составени само од водови, кај кои се јавуваат повеќекратни рефлексии. Денес кога постојат моќни компјутерски програми, пресметките се вршат нумерички со примена на готова програма, но сепак иако методот на мрежен дијаграм во практиката повеќе не се користи, сепак, тој има едукативно значење бидејќи му помага на читателот полесно да ги сфати процесите на повеќекратните прекршувања и одбивања на брановите по енергетските водови. Примената на овој метод во натамошниот дел од текстот ќе биде објаснета на еден прост пример кога пренапонски бран упаѓа во мрежа и наидува на сервиска врска од три вода со различни карактеристични импеданции, како што е тоа прикажано на сликата 4.29.



**Слика 4.29. Упад на пренапонски бран во сервиска врска од водови со различни карактеристики**

Прикажаниот случај во праксата се среќава во случаите кога кабелски вод се користи за вкрстување и/или премин на надземниот вод преку некаков пресечен објект (пруга, пат, река и сл.).

Како што се гледа од сликата 4.29, по првиот вод со импеданција  $Z_1$  упаѓа пренапонски бран прикажан со форма на линеарно растечко чело и константен грб. Тој може да се опише со следната аналитичка формула:

$$u(t) = a \cdot [t \cdot h(t) - (t - T_c) \cdot h(t - T_c)]. \quad (4.87)$$

Во (4.87) со  $a$  е означена стрмнината на челото на упадниот бран додека со  $T_c$  е означено траењето на челото од упадниот бран.  $h(t)$  претставува единечка отскочна (хевисајдова) функција.

Упадниот бран ќе предизвика повеќекратни рефлексии во средниот вод со импеданција  $Z_2$  ( $Z_2 \neq Z_1$  и  $Z_2 \neq Z_3$ ). Коefициентите на прекршување во точките А и В се дадени со следните изрази:

$$\alpha_{1A} = \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2} \quad \text{коefициент на прекршување за бранот кој што се простира по водот 1 наидува на точката А;}$$

$$\alpha_{2A} = \frac{2Z_1}{Z_1 + Z_2} \quad \text{коefициент на прекршување за бранот кој што се простира по водот 2 наидува на точката А;}$$

$$\alpha_{2B} = \frac{2Z_3}{Z_2 + Z_3} \quad \text{коefициент на прекршување за бранот кој што се простира по водот 2 наидува на точката В.}$$

Коefициентите на прекршување за точките А и В се пресметуваат со следните изрази:

$$\beta_{1A} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} \quad \text{коefициент на одбивање за бранот кој што се простира по водот 1 наидува на точката А;}$$

$$\beta_{2A} = \frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2} \quad \text{коefициент на одбивање за бранот кој што се простира по водот 2 наидува на точката А;}$$

$$\beta_{2B} = \frac{Z_3 - Z_2}{Z_2 + Z_3} \quad \text{коefициент на одбивање за бранот кој што се простира по водот 2 наидува на точката В.}$$

Ако со  $\tau$  го означиме времето на простирање на бранот по вториот вод 2, чија должина е  $d$ , и ако со  $v$  ја означиме брзината на простирање на брановите по тој вод, тогаш ќе биде:

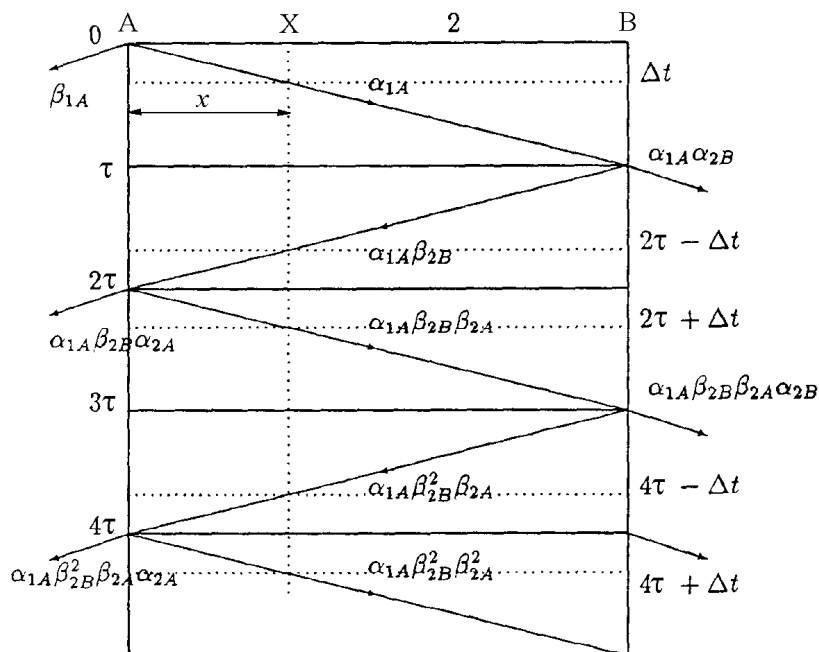
$$\tau = d/v. \quad (4.88)$$

Аналитичкиот израз за напонот  $u$  во било која точка А или В може да се напише на база на претходно формируваниот "мрежен дијаграм" кој графички го опишува процесот на повеќекратното прекршување и одбивање на брановите. Изгледот на таквиот дијаграм, за случајот од сликата 4.29, е прикажан на сликата 4.30. На овој мрежен дијаграм на апсцисната оска се нанесува растојанието  $x$  додека на ординатната оска, која е насочена надолу, се нанесува времето, изрзено како повеќекратник на времето на простирање  $\tau$ . Бранот којшто наидува во точката А по водот 1 се прекршува со коефициент на прекршување  $\alpha_{1A}$ , продолжувајќи да патува по водот 2.

Ако со  $t = 0$  го означиме моментот кога тој стигнал во точката А, тогаш во  $t = \tau$  тој ќе пристигне во точката В. Движењето на овој бран по водот 2 на мрежестиот дијаграм е означено со права линија поставена под агол во однос на хоризонталата чија што вредност е обратно пропорционална на брзината на простирање.

Амплитудата на прекршениот бран којшто продолжува да се движи по водот 2 ќе биде еднаква на вредноста  $\alpha_{1A} \cdot u(t)$  бидејќи упадниот бран се прекршува со коефициентот  $\alpha_{1A}$ . Јасно е дека дел од упадниот бран што наидува на точката А се одбива и како одбиен бран се простира во инверзна насока, од десно налево. Вредноста на одбиениот бран, со оглед на горе кажаното, ќе биде  $\beta_{1A} \cdot u(t)$ .

Прекршениот бран којшто продолжил да се движи по водот 2 кон точката В после време  $t = \tau$ , стасува до точката В. Тука дел од тој бран се прекршува,  $\alpha_{1A} \cdot \alpha_{2B} \cdot u(t)$  и прекршениот бран продолжува да се движи по водот 3 надесно, во директна насока, а дел се одбива. Делот што ќе се одбие од точката В и како одбиен бран ќе почне да се простира по водот 2, но во инверзна насока, (налево) изнесува  $\alpha_{1A} \cdot \beta_{2B} \cdot u(t)$ . После време  $t = 2\tau$  тој доаѓа до точката А. Дел од него ( $\alpha_{1A} \cdot \beta_{2B} \cdot \alpha_{2A} \cdot u(t)$ ) се прекршува во точката А и продолжува по водот 1 движејќи се налево, во инверзна насока, додека преостанатиот дел се одбива од точката А и продолжува да се движи по водот 2 простирајќи се директна насока. Големината на тој одбиен бран изнесува  $\alpha_{1A} \cdot \beta_{2B} \cdot \beta_{2A} \cdot u(t)$ .



Слика 4.30. Мрежен дијаграм за случајот на три редно врзани водови

Целиот процес на повеќекратните рефлексии е сликовито прикажан мрежестиот дијаграм од сл. 4.30. Напонот  $u(t)$  во произволна точка  $X$  од водот 2 и во произволен момент  $t$ , ќе го добиеме како збир од моментните вредности на сите бранови коишто упаѓаат од обете страни во посматраната точка  $X$ . Сите тие, освен еден (изворниот упаден бран) се генерирани во процесот на повеќекратното прекршување и одбивање на релацијата А – В. Поради тоа сите тие упаѓаат во точката  $X$  со некакво задоцнување.

По сумирањето на сите упадни бранови, водејќи притоа сметка за коефициентите на прекршување и одбивање од точките А и В, но водејќи сметка и за ниното доцнење, може да се напише следниот аналитички израз со којшто е опишана промената на напонот  $u_X(t)$  во точката  $X$ :

$$\begin{aligned}
u_X(t) = & \alpha_{1A} \cdot u(t - \Delta t) \cdot h(t - \Delta t) + \\
& + \alpha_{1A} \cdot \beta_{2B} \cdot u(t - 2\tau + \Delta t) \cdot h(t - 2\tau + \Delta t) + \\
& + \alpha_{1A} \cdot \beta_{2B} \cdot \beta_{2A} \cdot u(t - 2\tau - \Delta t) \cdot h(t - 2\tau - \Delta t) + \\
& + \alpha_{1A} \cdot \beta_{2B}^2 \cdot \beta_{2A} \cdot u(t - 4\tau + \Delta t) \cdot h(t - 4\tau + \Delta t) + \\
& + \alpha_{1A} \cdot \beta_{2B}^2 \cdot \beta_{2A}^2 \cdot u(t - 4\tau - \Delta t) \cdot h(t - 4\tau - \Delta t) + \dots
\end{aligned} \tag{4.89}$$

Бидејќи е  $h(t - \Delta\tau) = 0$  за времиња  $t < \Delta\tau$ , тоа значи дека првата компонента од сумата упадни бранови од (4.89) за прв пат ќе се појави дури откако прекршениот бран  $\alpha_{1A} \cdot u$  ќе пристигне до точката  $X$ , а тоа се случува во моментот  $t = \Delta t = X/v$ . Слично на ова, вториот член од изразот (4.89), кој ја дефинира компонентата од упадните бранови која го претставува прекршениот, па потоа и одбиениот бран од точката В,  $\alpha_{1A} \cdot \beta_{2B} \cdot u(t - 2\tau + \Delta t) \cdot h(t - 2\tau + \Delta t)$ , ќе пристигне ќе се појави за прв пат во точката  $X$  дури во моментот  $t = 2\tau - \Delta t$ , итн.

Ако го земеме предвид изразот (4.84) со помош на којшто е опишан обликот на упадниот бран во аналитичка форма, тогаш за временскиот тек  $u_X(t)$  на напонот во точката  $X$  ќе се добие следното:

$$\begin{aligned}
u_X(t) = & \alpha_{1A} \cdot a \cdot (t - \Delta t) \cdot h(t - \Delta t) - \alpha_{1A} \cdot a \cdot (t - T_c - \Delta t) \cdot h(t - T_c - \Delta t) + \\
& + \alpha_{1A} \cdot \beta_{2B} \cdot a \cdot (t - 2\tau + \Delta t) \cdot h(t - 2\tau + \Delta t) - \\
& - \alpha_{1A} \cdot \beta_{2B} \cdot a \cdot (t - T_c - 2\tau + \Delta t) \cdot h(t - T_c - 2\tau + \Delta t) + \\
& + \alpha_{1A} \cdot \beta_{2B} \cdot \beta_{2A} \cdot a \cdot (t - 2\tau - \Delta t) \cdot h(t - 2\tau - \Delta t) - \\
& - \alpha_{1A} \cdot \beta_{2B} \cdot \beta_{2A} \cdot a \cdot (t - T_c - 2\tau - \Delta t) \cdot h(t - T_c - 2\tau - \Delta t) + \\
& + \alpha_{1A} \cdot \beta_{2B}^2 \cdot \beta_{2A} \cdot a \cdot (t - 4\tau + \Delta t) \cdot h(t - 4\tau + \Delta t) - \\
& - \alpha_{1A} \cdot \beta_{2B}^2 \cdot \beta_{2A} \cdot a \cdot (t - T_c - 4\tau + \Delta t) \cdot h(t - T_c - 4\tau + \Delta t) + \\
& + \alpha_{1A} \cdot \beta_{2B}^2 \cdot \beta_{2A}^2 \cdot a \cdot (t - 4\tau - \Delta t) \cdot h(t - 4\tau - \Delta t) - \\
& - \alpha_{1A} \cdot \beta_{2B}^2 \cdot \beta_{2A}^2 \cdot a \cdot (t - T_c - 4\tau - \Delta t) \cdot h(t - T_c - 4\tau - \Delta t) + \dots
\end{aligned} \tag{4.90}$$

Врз основа на последниот израз е можно да се нацрта временскиот тек на напонот во точката  $X$  што се наоѓа на водот 2 на произволно растојание  $x = v \cdot \Delta t$ , од неговиот почеток. На сликата 4.28 е прикажан еден таков пример. Во конкретниот случај, прикажа на оваа слика се работи за следните параметри на посматраниот систем:  $a = 1000 \text{ kV}/\mu\text{s}$ ;  $T_c = 1 \mu\text{s}$ ; време на простирање на брановите по водот 2  $\tau = 4 \mu\text{s}$ ; растојание  $x$  од почетокот на водот 2 (точка А) до посматраната точка  $X$ :  $x = 300 \text{ m}$ ;  $\Delta t = x/v = 1 \mu\text{s}$ ; карактеристични импеданции на водовите:  $Z_1 = Z_3 = 400 \Omega$ ;  $Z_2 = 50 \Omega$ .

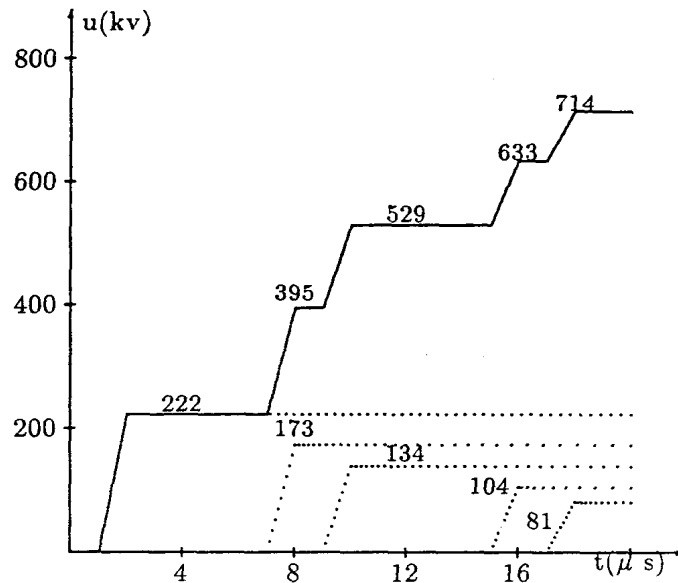
Коефициентите на прекршување и одбивање во конкретниот случај ќе бидат:

$$\alpha_{1A} = 0,2222; \quad \beta_{2B} = 0,7778; \quad \beta_{2A} = 0,7778.$$

Врз основа на изразот (4.90) и пресметаните бројни вредности, добиен е следниот временски тек:

$$\begin{aligned}
 u_X(t) = & 222 \cdot (t-1) \cdot h(t-1) - 222 \cdot h(t-2) + \\
 & +173 \cdot (t-7) \cdot h(t-7) - 173 \cdot (t-8) \cdot h(t-8) - \\
 & -134 \cdot (t-9) \cdot h(t-9) - 134 \cdot (t-10) \cdot h(t-10) + \\
 & +104 \cdot (t-15) \cdot h(t-15) - 104 \cdot (t-16) \cdot h(t-16) - \\
 & +81 \cdot (t-17) \cdot h(t-17) - 81 \cdot (t-18) \cdot h(t-18) + \dots
 \end{aligned}
 \tag{4.91}$$

а врз основа на него се добива и графикот на зависноста  $u_X(t)$ , прикажан на сликата 4.31.



**Слика 4.31. Зависност  $u_X(t)$  на напонот во точка X на водот 2 на произволно растојание  $x$  од неговиот почеток, при упад на бран со косоаголно чело**

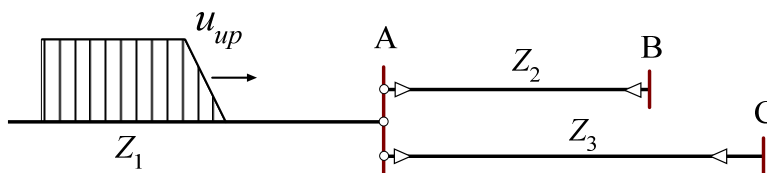
На сликата 4.31 со точкасти линии се означени одделните упадни бранови во точката X, додека полната линија на тој дијаграм ја претставува нивната сума, т.е. временскиот тек  $u_X(t)$  на напонот во точката X. На наполно ист начин може да се пресметува и временската промена  $u(t)$  на напонот во било која точка на некој од водовите 1, 2 или 3 во процесот на повеќекратните прекршувања и одбивања на брановите.

Лесно може да се докаже дека после бесконечен број рефлексии (или практично после само десетина рефлексии од обата краја на водот 2) напонот во точката X,  $u_X$ , ќе се стационарира на вредноста:

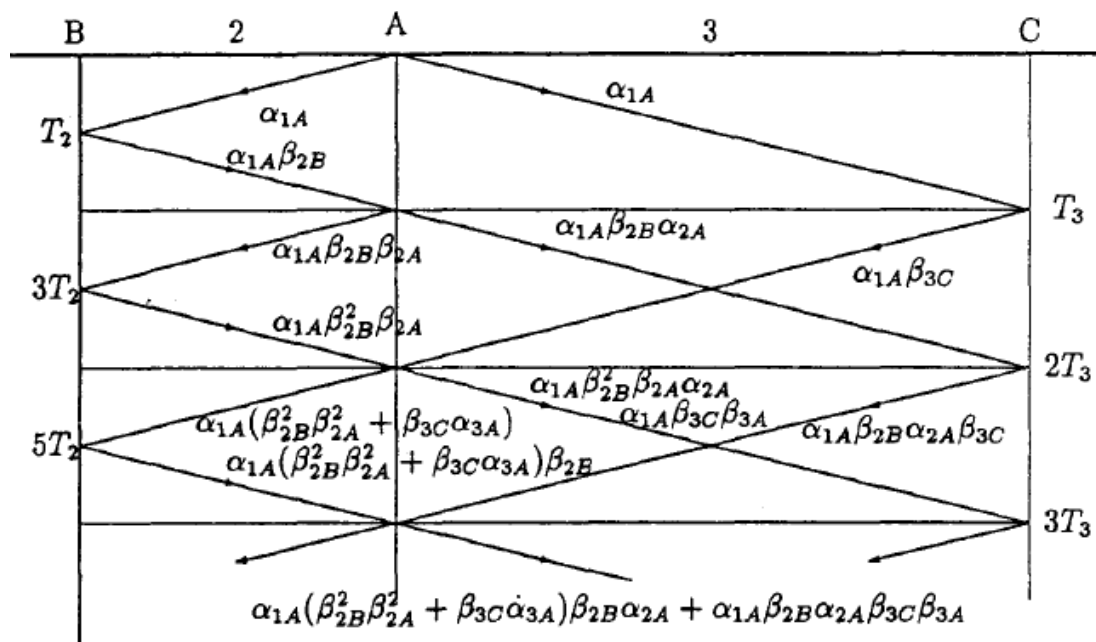
$$u_X \rightarrow \frac{2Z_3}{Z_1 + Z_3} \cdot U_m.
 \tag{4.92}$$

Од последната релација заклучуваме дека после доволно голем број рефлексии на средниот вод 2 се воспоставува напон кој што би се постигнал и во случајот кога упадниот бран би се прекршувал директно од првиот, на третиот вод 3, како средниот вод воопшто да не постои. Објаснението на оваа појава лежи во фактот што после големиот број рефлексии напонот по должината на целиот вод 2 се изедначува и стационарира така што должината  $d$  на водот 2 веќе нема никакво влијание врз висината на напоните, па обата негови краја постепено започнуваат да се владеат како да се една иста точка која што е заедничка за обата крајни вода.

Методот на мрежен дијаграм може да се применува и на посложени шеми, но тогаш неговата промена е значително понепрегледна и понеприкладна. Так, на пример, ако во колото имаме само два куси вода (кабли) со карактеристични импеданции кои што се разликуваат од останатите, како што е случајот со колото од сликата 4.32, мрежниот дијаграм ќе биде значително посложен и ќе има изглед како што е тоа прикажано на сликата 4.33. Затоа таквите и посложени системи обично се решаваат со помош на готови компјутерски програми. За една таква програма ќе стане збор во наредната точка.



Слика 4.32. Еквивалентна шема на постројка со надземен вод (1) и два кабла (2) и (3)



Слика 4.33. Мрежен дијаграм за случајот прикажан на сликата 4.32

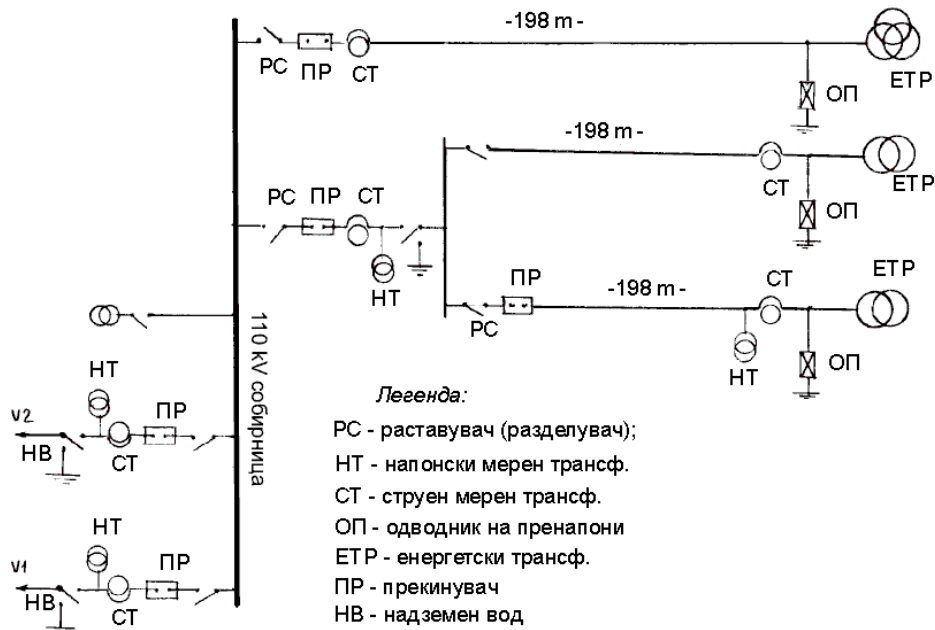
#### 4.4.2. Компјутерска програма за пресметување на брановите процеси

Заменските шеми со коишто се претставуваат електроенергетските системи (ЕЕС) во импулсниот период претставуваат сложени електрични кола составени од разни елементи. Основни елементи во нив се водовите – елементи со распределени параметри, кои на преодните процеси им даваат бранов карактер. Но при анализите мора да бидат земени предвид и уредите како и апаратите во системот, кои претставуваат елементи со концентрирани параметри. Тие се моделираат со соодветни капацитети, индуктивнитети, линеарни или нелинеарни отпорници, искришта и др. На тој начин се добива заменска шема со сложена структура а тоа прави и самите преодни процеси што се одигруваат во тоа коло да бидат сложени.

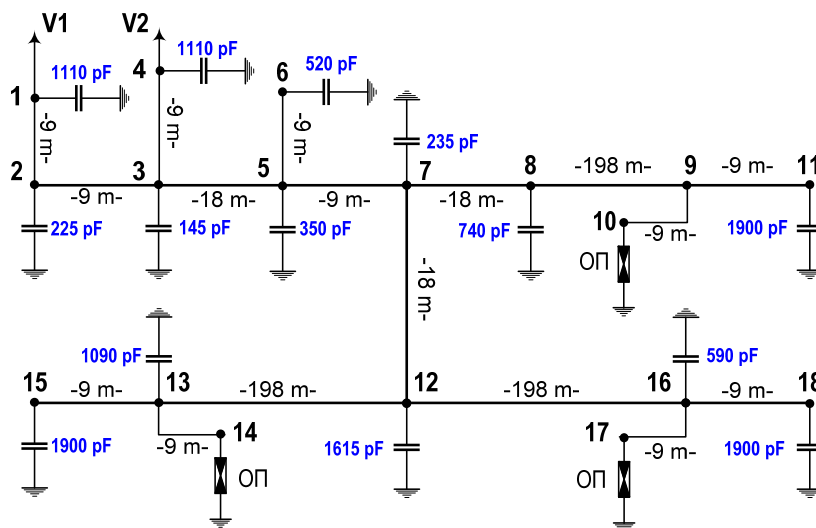
За илустрација на кажаното, на сликата 4.34 е прикажан 110 kV дел од една разводна постројка во Р. Македонија, додека на сликата 4.35 е прикажана нејзината соодветна еквивалентна шема со чија помош се вршат анализите на брановите преодни процеси кои настану-



ваат при упад на пренапонски бран од атмосферско потекло во постројката. Во еквивалентното коло се присутни практично сите елементи коишто учествуваат во преодниот процес.



Слика 4.34. 110 kV дел од една разводна постројка



Слика 4.35. Еквивалента шема на прикажаната постројка со која се вршат пресметки на брановите преодните процеси во импулсен период

Посебен предмет на интерес во ваквите анализи се разводните постројки и трансформаторските станици каде што анализата на преодните процеси под дејство на атмосферските пренапони се истражува детално заради проценка на опасностите што кај нив постојат од таквите пренапони. Во таквите објекти основен елемент на заштитата е одводникот на пренапони кој со своето присуство, поради својата нелинеарна волт-амперна карактеристика и присуството на искриштето, во значителна мера ги отежнува анализите на преодните процеси. Но тука се и приклучните кабли и надземни водови и сите останати уреди – енергетски трансформатори, прекинувачи, разделувачи (раставувачи) мерни трансформатори, придруш-

ници, искришта, и др. Сите споменати уреди на постројката во импулсниот период се моделираат со својот влезен капацитет. Придушниците, пак, се моделираат со својот индуктивитет.

Реактивните елементи (индуктивитети и капацитети) воведуваат односи помеѓу електричните величини коишто се опишуваат со диференцијални равенки од прв ред. Ваквите диференцијални равенки е најзгодно да се решаваат нумерички, со примена на некоја позната постапка. Се покажува дека за таа цел, од аспект на изработка на компјутерската програма, најповолно е да се користи познатото "трапезно правило" за нумеричка интеграција, кое што всушност е познатиот метод за нумеричка интеграција на системи диференцијални равенки Рунге-Кута (Runge Kutta) од втор ред. Со неговата примена лесно се докажува дека тие може успешно да се моделираат со идеални куси водови. Така, на пример, може да се докаже дека напречно (паралелно) приклучениот капацитет може да се моделира со еден идеален кус, вод отворен на својот крај. Слично, напречно приклучениот индуктивитет се моделира со кус идеален вод заземјен на својот крај додека, пак, редно поставениот индуктивитет може да се замени со еден кус идеален вод исто така редно поставен на истото место во колото.

Станува јасно дека поради постоењето на реактивните елементи во шемата но и поради постоењето на нелинеарните уреди (одводници на пренапони), преодниот процес во еквивалентното коло ќе се решава со помош на некаква нумеричка постапка. Значи преодниот процес ќе се дискретизира а временскиот тек на одделните величини што се истражуваат ќе се добива во форма на низа дискретни вредности (броеви). Притоа временскиот чекор  $\Delta t$ , со кој што ќе се вршат анализите, треба да биде доволно мал за да бидат грешките поради нумериката прифатливи, т.е. занемарливи, но не и премали, заради неоправданото зголемување на потребното пресметковно време. Во исто време ќе биде потребно да се избере таков временски чекор  $\Delta t$  со кој што ќе се постигне т.н. "просторен чекор", т.е. величината  $\Delta l = v_0 \cdot \Delta t$ , да се содржи цел број пати во должината од секој вод на постројката/мрежата и/или, по потреба, да се изврши заокружување на тие должини на најблиските погодни вредности. Вообичаените вредности на временските чекори на интеграција при ваквите анализи се од редот на големина  $\Delta t = 0,01 \mu s$ .

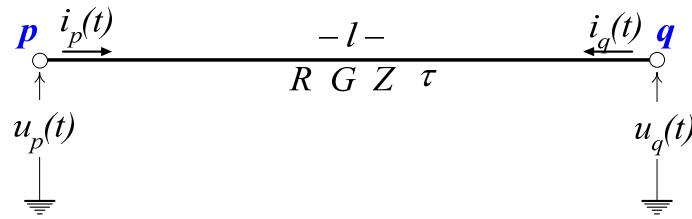
За моделирањето на водовите и за брановиот карактер на преодните процеси на нив веќе беше зборувано на почетокот на оваа глава. Кога станува збор за анализа на преодните процеси во разводните постројки и трансформаторските станици вообичаено е водовите во анализите да се третираат идеализирано, т.е. се смета дека се без загуби, иако е можно во таквите анализи да се воведат и загубите, т.е. придушнувањето. Но овде ќе биде многу поважно моделот на водот да се прилагоди на неговата основна задача и потреба – изготвување на компјутерска програма, што значи дека ќе биде потребно да се усвои модел којшто успешно ќе се "вклопи" во алгоритмот со којшто се решава анализираното електрично коло. Затоа во натамошниот дел од текстот ќе се осврнеме на еден таков модел.

Се покажува<sup>1</sup> дека помеѓу приликите на "почетокот"  $p$  и "крајот"  $q$  на еден вод,  $u_p(t)$  и  $i_p(t)$ , односно  $u_q(t)$  и  $i_q(t)$ , (со означените насоки на струите) важат следните релации (слика 4.36):

$$\begin{aligned} u_p(t) \cdot \left(1 + \frac{Z \cdot G}{2}\right) - Z \cdot i_p(t) \cdot \left(1 + \frac{R}{2Z}\right) = \\ = u_q(t - \tau) \cdot \left(1 - \frac{Z \cdot G}{2}\right) + Z \cdot i_q(t - \tau) \cdot \left(1 - \frac{R}{2Z}\right) \end{aligned} \quad (4.93)$$

<sup>1</sup>) Р. Ачковски, "Анализа поузданости разводних постројења од атмосферских пренапона помоѓу рачунских машина", магистарски рад. ЕТФ–Београд, 1977.

Исто така се покажува<sup>2</sup> дека кога е водот релативно "кус" (до неколку km), со доволна точност релацијата (4.93) може да се опише и на многу поедноставен начин:



Слика 4.36. Врска помеѓу приликите на почетокот и крајот од еден вод

$$u_p(t) - Z \cdot i_p(t) = [u_q(t - \tau) + Z \cdot i_q(t - \tau)] \cdot e^{-\delta'}; \quad (4.94)$$

$$\delta' = 0,5 \cdot (R/Z + G \cdot Z)$$

односно, со занемарување на загубите во водот ( $R = 0$ ;  $G = 0$ )

$$u_p(t) - Z \cdot i_p(t) = u_q(t - \tau) + Z \cdot i_q(t - \tau). \quad (4.95)$$

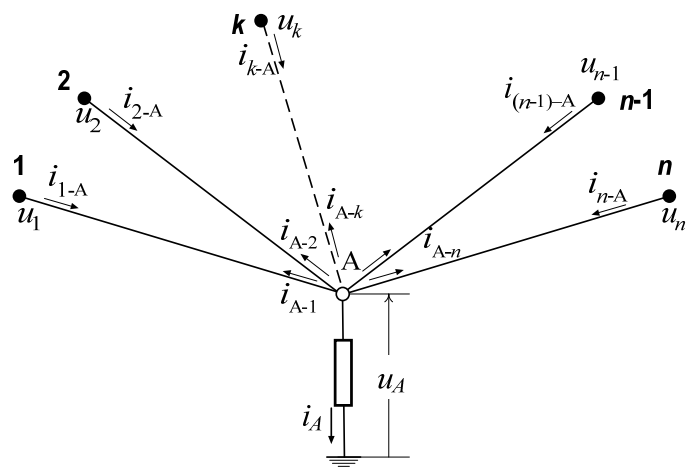
Врз основа на релациите (4.26) може лесно да се докаже дека изразот на десната страна од (4.95) е всушност двојната вредност на упадниот бран којшто од крајот на водот (точката "q") патува кон неговиот почеток (точката "p"), но со својата вредност во "минатото", т.е. во моментот  $(t - \tau)$ , заради ефектот на "простирање" на брановите.

Во релациите (4.93) – (4.95) и на сликата 4.34, слично како и досега, се воведени следните означувања:  $l$  – должина на водот;  $\tau$  – време на простирање на брановите по водот ( $l = v \cdot \tau$ );  $Z$  – карактеристична импеданција на водот;  $R$  и  $G$  – вкупна активна отпорност и одводност на водот.

Слично, приликите на "крајот" од водот можат да се изразат преку приликите на "почетокот" од водот, со помош на изразите (4.96):

$$u_q(t) - Z \cdot i_q(t) = u_p(t - \tau) + Z \cdot i_p(t - \tau). \quad (4.96)$$

Врз основа на изразите (4.93) и (4.96) е можно да се воспостави врска помеѓу одделните електрични величини (напони и струи) во јазлите од едно електрично коло. Покрај нив, треба да бидат земени превид и останатите релации помеѓу напоните и струите во одделните јазли од колото воведени од уредите во системот (индуктивитети, капацитети, концентрирани отпорници, одводници на пренапони и сл.). Решавањето на оваа задача води кон воведувањето на поимот "обопштен јазел".



Слика 4.37. Обопштен јазел

Обопштен јазел

Обопштениот јазел претставува најпогоден тополошки елемент за анализа на брановите процеси во ЕЕС. За секој јазел A од посматраниот систем е можно да се напише по еден пар алгебарски равенки со кои се дефинира состојбата  $u_A(t)$  и  $i_A(t)$  во посматраниот јазел (слика

<sup>2</sup> исто.

4.38). Првата од тие равенки произлегува од односите помеѓу посматраниот јазел А и соседните јазли во колото, т.е. состојбата во јазелот А во посматраниот момент  $t$  зависи од состојбите во преостанатите соседни јазли со кои јазелот А има директна врска во минатото ( $t-\tau_j$ ). Обликот на таа равенка е даден со изразот (4.97) и тој е практично идентичен со изразот (4.70) односно (4.7) што произлегува од Петерсеновото правило.

$$u_A(t) - Z_{ek} \cdot i_A(t) = E_A = Z_{ek} \cdot \sum_{j=1}^n \frac{u_j(t-\tau_j)}{Z_j} + i_j(t-\tau_j). \quad (4.97)$$

Во релацијата (4.97) фигурира "еквивалентната" импеданција  $Z_{ek}$  т.е. импеданцијата на "еквивалентниот вод". Таа се пресметува според релацијата (4.71).

Но за комплетното решавање на состојбата во посматраниот јазел А,  $u_A(t)$  и  $i_A(t)$ , е потребна уште една релација помеѓу непознатите  $u_A(t)$  и  $i_A(t)$ . Таа е дефинирана од типот на елементот приклучен во јазелот А, т.е. од зависноста  $i_A=f(u_A)$ . Доколку во точката А нема таков елемент, тогаш  $i_A = 0$ .

Може да се покаже дека кога се работи за паралелно приклучен кондензатор  $C$ , таквата зависност е линеарна и го има обликот (4.98), додека кога се работи за паралелно приклучен индуктивитет  $L$ , таа зависност го има обликот (4.99).

$$u_A(t) - Z_C \cdot i_A(t) = E_C \equiv u_A(t-\Delta t) + Z_C \cdot i_A(t-\Delta t). \quad (4.98)$$

$$u_A(t) - Z_L \cdot i_A(t) = E_L \equiv -[u_A(t-\Delta t) + Z_L \cdot i_A(t-\Delta t)]. \quad (4.99)$$

Во релациите (4.98) и (4.99) се воведени следните обележувања:

$$Z_C = \frac{\Delta t}{2C}; \text{ и } Z_L = \frac{2L}{\Delta t}. \quad (4.100)$$

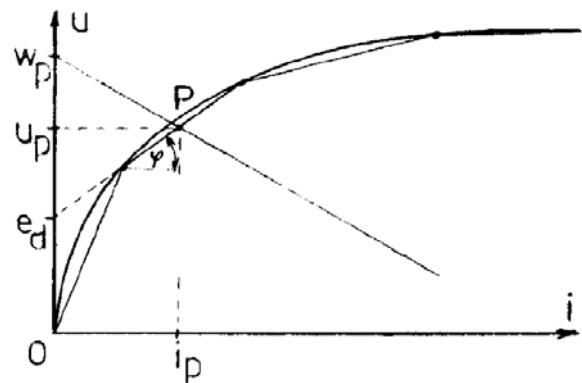
Кога приклучениот елемент е нелинеарен одводник на пренапони, тогаш односот помеѓу непознатите  $u_A(t)$  и  $i_A(t)$  е исто така нелинеарен:

$$u_A = f(i_A). \quad (4.101)$$

На тој начин вредностите на непознатите напон и струја  $u_A(t)$  и  $i_A(t)$  во моментот  $t$  се добиваат како решение на еден систем алгебарски равенки од втор ред. Првата е релацијата (4.97), а втората една од преостанатите релации (4.98), (4.99) или (4.100). Тој претставува симултан систем од две линеарни равенки со две непознати кога се работи за реактивен елемент приклучен во посматраната точка А (индуктивитет или капацитет). Но системот е нелинеарен кога се работи за одводник на пренапони. Последниот случај се решава нумерички, со помош на некој итеративен метод (нпр. Њутоновиот итеративен метод) за решавање на нулите на трансцендентните или нелинеарните равенки.

Можна е и примена на претходната постапка (решавање на симултан систем алгебарски равенки од втор ред) доколку се изврши сегментна линеаризација на нелинеарната карактеристика на одводникот на пренапони (слика 4.38).

Така, за секој јазел  $j$  од мрежата ќе напишеме по две алгебарски равенки од типот (4.97) – (4.100) и со нивното решавање ги пресметуваме сите напони во јазлите  $u_j(t)$  и сите струи



Слика 4.38. Сегментна линеаризација на нелинеарната карактеристика  $u(i)$  на еден одводник

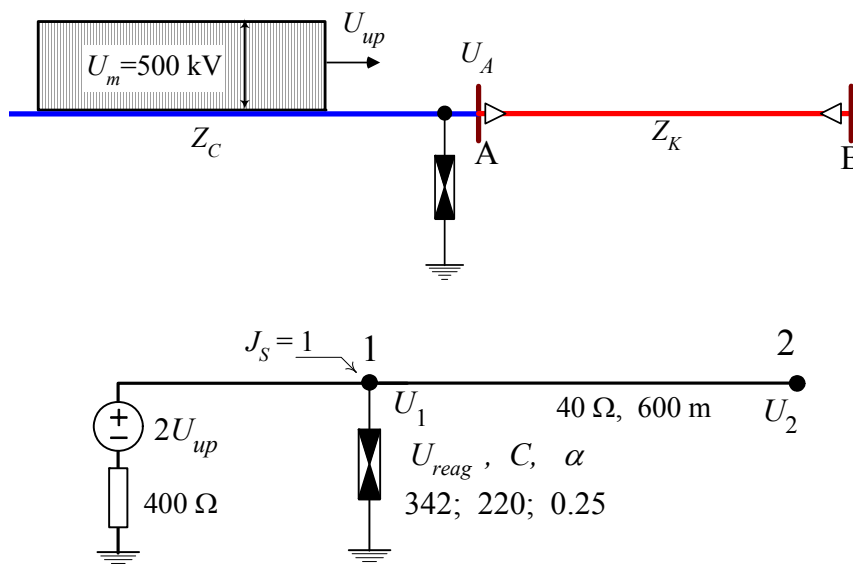
$u_j(t)$  кои што во посматраниот момент  $t$  истекуваат од посматраниот јазел. Со тоа е накусо опишан алгоритмот на кој е базирана програмата ВР (Бранови Процеси во ЕЕС) за пресметка на брановите преодни процеси во ЕЕС која што е изготвена од авторот на овој материјал и за која ќе стане збор и во натамошниот дел од текстот.

Програмата ВР е напишана во VBA која работи под апликацијата Excell. Со неа е можно да се решаваат кола кои содржат водови, т.е. елементи со распределени параметри, но и елементи со концентрирани параметри (индуктивнитети, капацитети, отпорници, одводници на пренапони и сл.) при што целосно се задржува и репродуцира брановиот карактер на процесите. Анализираниот коло, притоа, може да има произволна сложеност, произволна топологија и произволен обем (димензија). Ги прифаќа сите елементи коишто беа досега споменати. Прифаќа и постоење на редно врзани индуктивности  $L$ , (придушници, реактори) само што во тој случај таквиот индуктивнитет ќе треба да се претвори во соодветен "еквивалентен" вод. Таквиот еквивалентен вод ќе има должина  $l = v_0 \cdot \Delta t$  ( $v_0=300 \mu/ms$ ), и карактеристична импеданција  $Z_L = L/\Delta t$ . Единствено програмата ВР не прифаќа редно врзани капацитети, случај кој што има само теориско, но не и практично значење и редни отпорници.

Податоците за анализираниот систем се сместуваат во првиот Excell-ов работен лист (**Sheet 1**). За илустрација на работата со програмата ВР и начинот на којшто се опишува анализираниот систем нека го посматраме следниот случај (слика 4.39). Правоаголен бран со бесконечно траење и амплитуда  $U_m=500 \text{ kV}$  упаѓа по вод со импеданција  $Z_C=400 \Omega$ , во систем којшто се состои од еден кабел со карактеристична импеданција  $Z_K = 40 \Omega$  и должина  $L_K = 300 \text{ m}$  ( $v_K = 150 \text{ m}/\mu s$ , т.е. еквивалентна должина  $L_{ekv} = 600 \text{ m}$ ) и еден одводник на пренапони за којшто е познато дека има 100% напон на реагирање  $U_{reag} = 342 \text{ kV}$ , а неговата волт-амперна карактеристика е опишана со законот:

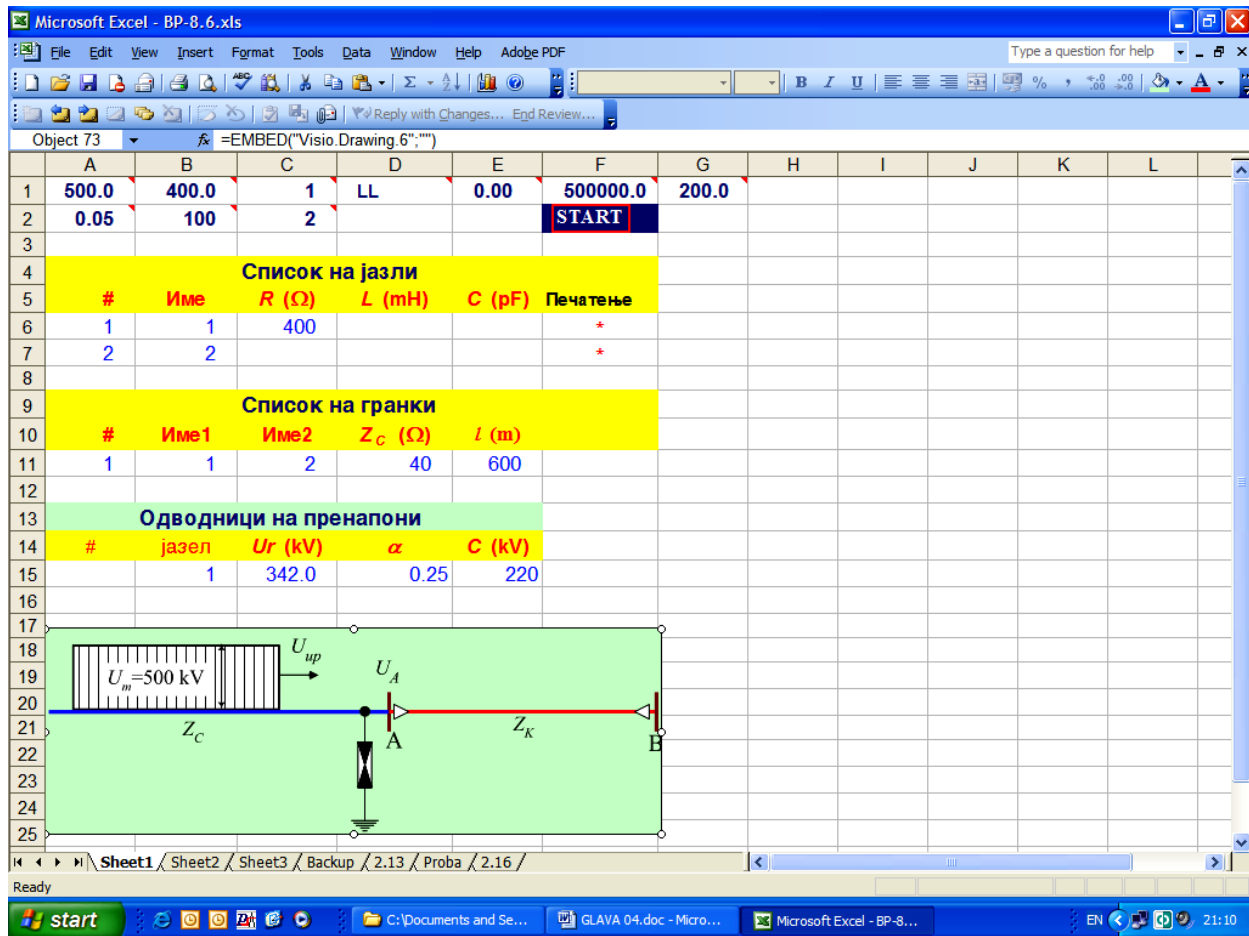
$$U_{od} = C \cdot i_{od}^\alpha; \quad C = 220 \text{ kV}; \quad \alpha=0,25; \quad U_{od} (\text{kV}), \quad i_{od} (\text{kA}). \quad (4.102)$$

Ако точката А ја нумерираме со редниот број 1, а точката В со бројот 2, тогаш е јасно дека системот ќе има два јазла, 1 и 2, еден вод (кабелот К), поврзан помеѓу јазлите бр. 1 и бр. 2 и еден одводник на пренапони приклучен во јазелот бр. 1.



Слика 4.39. Приказ на заменската шема на разгледуваниот систем, опишан со Excell-овиот работен лист Sheet1 на програмата ВР

Изгледот на работниот лист со којшто е опишана шемата од сликата 4.39 е прикажан на сликата 4.40.



Слика 4.40. Приказ на работниот лист Sheet1 од Excel – програмата BP

Во секоја од зафатените келии на работниот лист Sheet1 се внесува по еден податок којшто се однесува на некој од елементите од разгледуваниот систем. Податоците што се внесуваат во одделните келии се опишани во табелата 4.1. Притоа првата редица се однесува на податоците со кои се опишуваат карактеристиките и локацијата на упадниот бран додека втората редица се однесува на податоците за времињата на пресметување. Келиите од овие редици се детално опишани во табела 4.1.

Следи третата редица која е празна. Натаму започнуваат редиците со кои се опишува анализираниот систем. Следат две обврзни коментар-редици, т.е. редици коишто имаат улога на коментар и нивната содржина е ирелевантна за пресметките. Обврзните редици не смеат да се испуштат од работниот лист (програмот ги очекува на тоа место) иако нивната содржина воопшто не е важна.

Понатаму следат една (или повеќе) редици со кои што се опишуваат јазлите во системот. На секој јазел му е придружена по една редица и, како што се гледа од сликата 4.40, во неа се задаваат: следните податоци: 1) реден број на јазелот /#/; 2) име на јазелот /Име/; 3) вредноста на попречно приклучениот активен отпор /R(Ω)/ во тој јазел или пак доколку во тој јазел има приклучен вод со бесконечна должина, тука се внесува вредноста на неговата карактеристична импеданција (келијата останува празна ако нема таков отпор); 4) вредноста на попречно приклучениот индуктивитет /L(mH)/ (келијата останува празна ако

нема таков индуктивитет) и 5) вредноста на попречно приклучениот капацитет на кондензаторот во тој јазел /C (pF)/ (келијата останува празна ако нема таков кондензатор).

Откога ќе се внесат податоците за секој јазел од посматраниот систем, се остава една празна линија, па следуваат две (обврзни) коментар линии за податоците за гранките од системот. Потоа следува списокот на гранки. Треба да се напомене дека под гранки се сметаат сите постојни водови (освен упадниот). Исто така под гранки се подразбираат и "еквивалентните" водови, воведени од редно приклучените индуктивитети. Во последниов случај доколку се работи за индуктивитет со индуктивност  $L$ , тогаш тој се претвора во "еквивалентен кус" вод со карактеристична импеданција  $Z_L = L/\Delta t$  и со должина  $L_L = v_0 \cdot \Delta t$  ( $v_0 = 300 \text{ m}/\mu\text{s}$ ).

Притоа за секоја гранка од системот се резервира по една линија во која што се даваат податоци за: 1) редниот број на гранката /#/; 2) името на почетниот јазел /Име1/; 3) името на крајниот јазел /Име2/; 4) вредноста на карактеристичната импеданција на водот и 6) должина на водот /l(m)/. По завршувањето на списокот со гранки, следува една празна линија и нови две коментар–линии, за одводниците на пренапони, кои што се исто така обврзни, т.е. не смеат да се испуштаат.

Следуваат податоци за одводниците на пренапони во системот (доколку ги има). За секој одводник следува по една линија во која што се даваат следните податоци: 1) реден број на јазелот /#/; 2) име на јазелот /Име/ во кој што е приклучен одводникот на пренапони; 3) вредноста на 100% напон на реагирање /Ur(kV)/ на одводникот; 4) вредноста на коефициентот  $\alpha$  со којшто се опишува неговата волт-амперна карактеристика / $\alpha$  / и 5) константата  $C$  со којшто се опишува неговата волт-амперна карактеристика /C (kV)/, во согласност со изразите (4.102). Доколку нема одводници на пренапони линијата останува празна, или останува празна барем нејзината прва келија (реден број /#/).

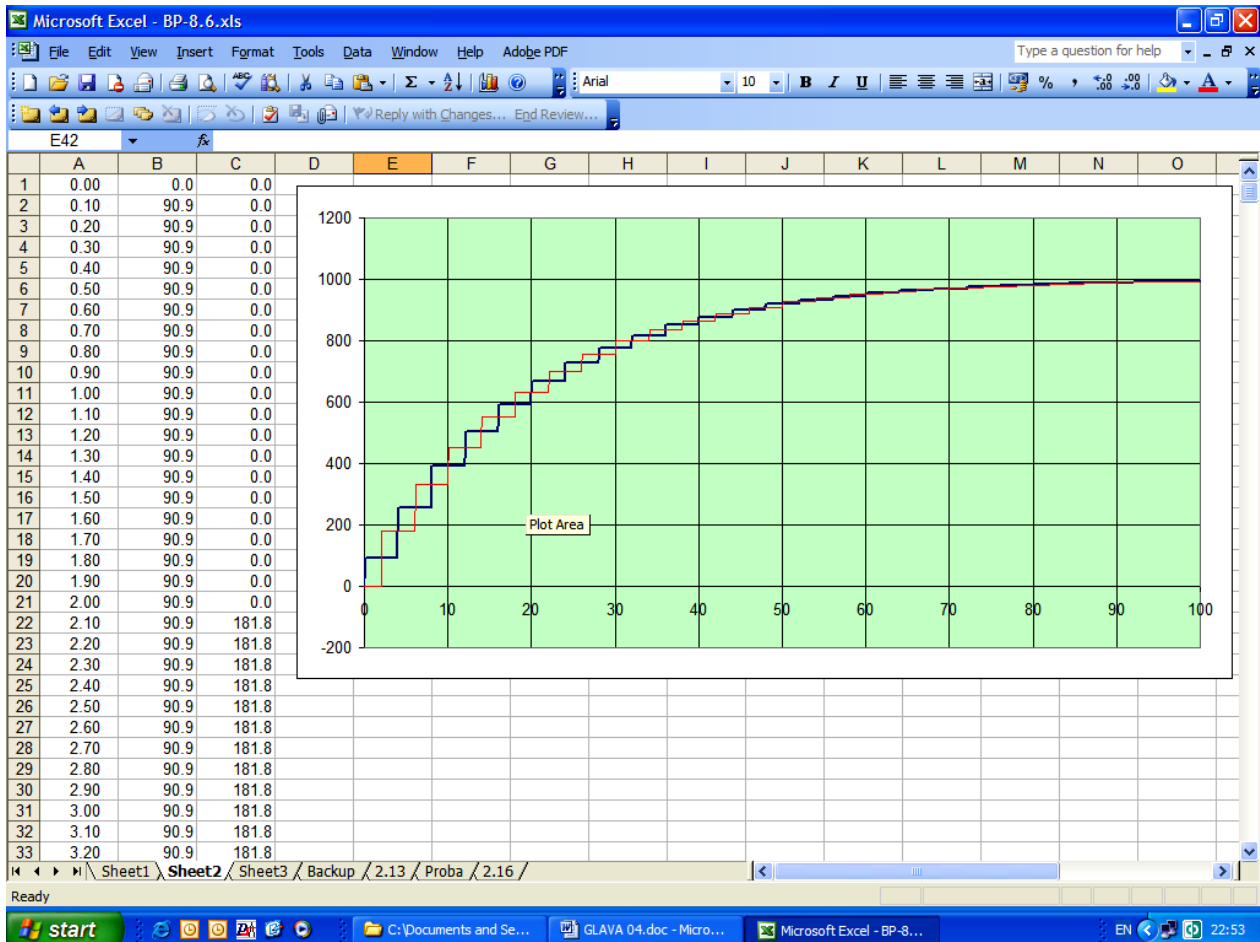
**Табела 4.1. Опис на келиите од првиот вториот ред на раб. лист Sheet1.**

Келија	Променлива	Вредност	Опис
A1	Um	500 kV	Темена вредност на упадниот пренапонски бран, (kV)
B1	Zc	400 Ω	Карактеристична импеданција на упадниот вод (Ω)
C1	J <sub>s</sub>	1	Индекс (р.бр.) на јазелот во којшто е приклучен упадниот вод
D1	Облик	LL	Облик на упадниот бран. (LL = лин. растечко чело и линеарен грб)
E1	T <sub>c</sub>	(μs)	Време на челото на упадниот бран, (μs)
F1	T <sub>z</sub>	(μs)	Време на грбот (зацењето) на упадниот бран, (μs)
G1	T <sub>T</sub>	(μs)	Време на траењето на упадниот бран, (μs)
A2	Δt	(μs)	Временски чекор со којшто нумерички се решава преодниот процес
B2	T <sub>вк</sub>	(μs)	Вкупно времетраење на посматрање на преодниот процес, (μs)
C2	n <sub>c</sub>	/	Чекор со којшто се запишува резултатот во табела (n <sub>c</sub> =2 значи дека во табелата со резултати во Sheet2 се запишува секој втор резултат.)

Програмата ВР се активира од апликацијата Excell со повикување на соодветно макро, т.е. компјутерска програма, напишана во јазикот Visual basic, притискајќи на копчето Start.

Резултатите од пресметките се запишуваат во форма на табела и во форма на дијаграм коишто се сместуваат во вториот работен лист Sheet2. Така добиените резултати можат да се ископираат и да се внесат во некој друг документ, извештај и слично.

За илустрација, на сликата 4.41 е прикажан дел од изгледот на вториот работен лист **Sheet2** со резултатите добиени како решение на случајот прикажан на првиот работен лист **Sheet1**.



**Слика 4.41. Приказ на работниот лист Sheet2 со резултатите од Excel – програмата BP**



## 5. МОДЕЛИРАЊЕ НА ЕЛЕМЕНТИТЕ НА ЕЕС ПРИ АНАЛИЗА НА АТМОСФЕРСКИТЕ ПРЕНАПОНИ

### 5.1. МОДЕЛИРАЊЕ НА АТМОСФЕРСКОТО ПРАЗНЕЊЕ

Во пресметките на пренапоните во ЕЕС атмосферското празнење се моделира со помош на струен бран со определен облик  $I_g(t)$  којшто наидува по каналот на громот. Самиот канал на громот се еквивалентира со вод со константна карактеристична импеданција  $Z_g$ . Обликот на струјниот бран, пак се моделира на разни начини. Овде ќе бидат прикажани само некои од нив.

#### *Струен бран со двојно експоненцијален облик*

Струјниот бран со двојно-експоненцијален облик може да се опише со следната релација:

$$I_g(t) = I_M \cdot (e^{-at} - e^{-bt}) \quad (5.1)$$

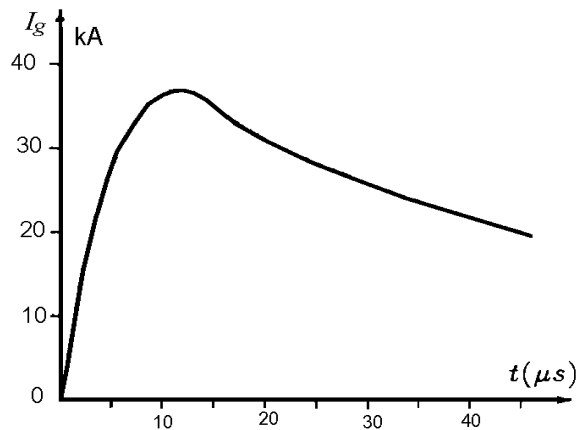
Струјата  $I_g$  ја достигнува својата максимална вредност  $I_m$  во моментот  $t_m$ :

$$t_m = \frac{\ln a - \ln b}{a - b} \quad (5.2)$$

Максималната вредност на струјата притоа изнесува:

$$I_m = I_M \cdot \left[ \left( \frac{a}{b} \right)^{\frac{-a}{a-b}} - \left( \frac{a}{b} \right)^{\frac{-b}{a-b}} \right] \quad (5.3)$$

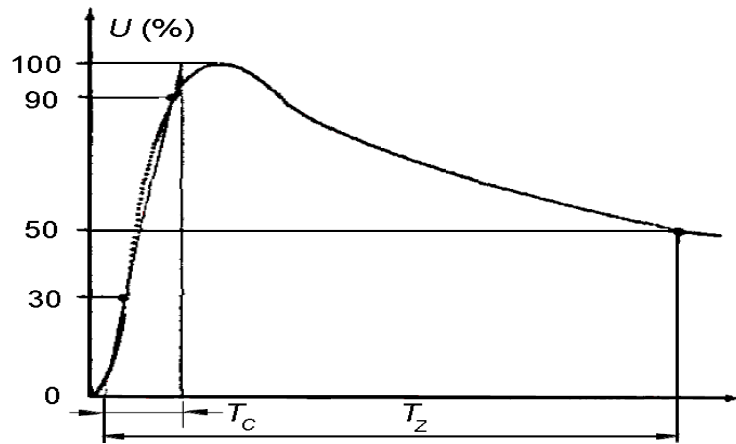
На сликата 5.1. е прикажана типичната форма на струјниот бран со двојно-експоненцијален облик.



Слика 5.1. Двојно-експоненцијален облик на струјниот бран

Изолацијата на опремата се испитува во лабораториски услови со ударен напонски бран кој треба да го симулира пренапонот од атмосферско потекло. Притоа се користи бран кој на самиот почеток од неговото чело има многу мала стрмнина и е донекаде различен од обликот на двојно-експоненцијалниот бран. Реалниот напонски бран што се користи во испитните лаборатории има облик како на сликата 5.2. На таа слика е прикажан и начинот на кој што се дефинирани параметрите на обликот од бранот. Челото од бранот се линеаризира со права линија која што минува низ точките од кривата чии ординати изнесуваат 30% и 90% од максималната вредност на напонскиот бран. Притоа номиналното

време на челото се дефинира како вкупно траење на така линеаризираното чело на бранот. Времето на грбот, пак, се дефинира како време сметано од почетокот на линеаризираното чело на бранот до оној момент кога напонот на напонскиот бран падне на половина од неговата амплитуда.



Слика 5.2. Дефинирање на времињата на челото и грбот на напонскиот ударен бран

Номиналното време на траењето на челото  $T_C$  и номиналното време на траење на грбот  $T_Z$  може приближно да се пресметаат со помош на релациите (5.4) и (5.5):

$$T_C = \frac{3,24}{b}, \quad (5.4)$$

$$T_Z = \frac{0,69}{a}. \quad (5.5)$$

Доколку ни се познати времињата  $T_C$  и  $T_Z$  и тогаш со помош на последните два изрази лесно ќе ги пресметаме вредностите на константите  $a$  и  $b$ .

Кај нас за испитување на изолацијата на високонапонската опрема се применува стандардниот атмосферски бран со параметри  $T_C = 1,2 \mu\text{s}$  и  $T_Z = 50 \mu\text{s}$ . Овој бран во стандардите се означува со ознаката  $\pm 1,2/50 \mu\text{s}/\mu\text{s}$ . (+ за позитивните, а – за негативните бранови).

Во пресметките на пренапоните од атмосферско потекло во ЕЕС многу често главните процеси и настани (прскок, пробив) се одвиваат на самото чело, кога и всушност дејствува преанпонската заштита. Во тие случаи кога процесите на грбот од бранот не се од особен интерес, обликот на бранот можеме да го упростиме и да го прикажеме со експоненцијален облик:

$$I_g(t) = I_m \cdot (1 - e^{-bt}). \quad (5.6)$$

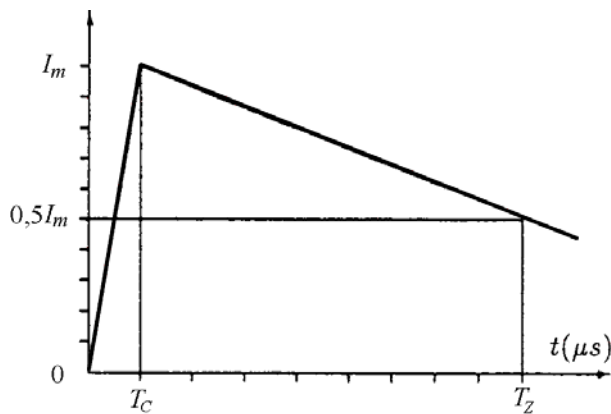
Овој облик всушност се добива кога во (5.3) се стави  $a \rightarrow \infty$ . Кај таквиот бран грбот трае бесконечно долго време.

### Струен бран со линеарно чело и линеарен грб

Струјниот бран со линеарно чело и линеарен грб се опишува со следната релација:

$$I_g(t) = a_1 \cdot t \cdot h(t) - a_2 \cdot (t - T_C) \cdot h(t - T_C) + (a_2 - a_1) \cdot (t - 2T_Z) \cdot h(t - 2T_Z) \quad (5.7)$$

Во (5.7) фигурираат величините  $a_1$  и  $a_2$  кои претставуваат стрмнина на челото и брзина на опаѓање на струјата на грбот од бранот. Нивните вредности можат да се добијат со помош на изразите:



$$a_1 = \frac{I_m}{T_c}, \quad (5.8)$$

$$a_2 = a_1 + \frac{I_m}{2T_z - T_c}. \quad (5.9)$$

Обликот на овој бран е прикажана на сликата 5.3.

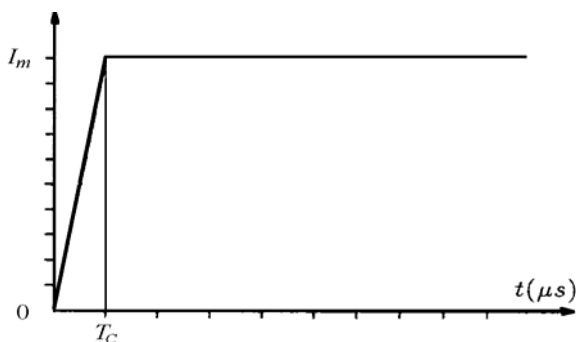
Слика 5.3. Бран со линеарно чело и линеарен грб

### Струен бран со линеарно чело и рамен грб

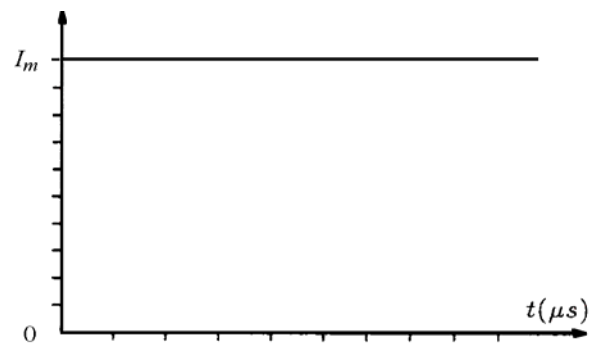
Струјниот бран со линеарно чело и рамен грб претставува модификација од претходниот бран и се однесува на случајот кога  $T_z \rightarrow \infty$ . Аналитички може да се опише со релацијата (5.10).

$$I_g(t) = I_m \cdot [t \cdot h(t) - (t - T_c) \cdot h(t - T_c)] \quad (5.10)$$

Овој облик е достав поволен за статистичка обработка на атмосферските пренапони бидејќи кај него фигурираат само два параметра – амплитудата  $I_m$  и времето на челото  $T_c$  односно стрмнината на челото  $S = I_m/T_c$ . На тој начин целокупната статистичка анализа може да се изврши само на база на две променливи кои имаат доминантно влијание врз резултатите од пресметките на ризиците од прескок/пробив на изолацијата.



Слика 5.4. Бран со линеарно чело и рамен грб



Слика 5.5. Бран со рамно чело и рамен грб

### Струен бран со рамно чело и рамен грб

Струјниот бран со рамно чело и рамен грб претставува модификација од претходниот бран и се однесува на случајот кога  $T_c \rightarrow 0$  и  $T_z \rightarrow \infty$ . Аналитички може да се опише со релацијата (5.11).

$$I_g(t) = I_m \cdot h(t) \quad (5.11)$$

Резултатите добиени со овој облик на бранот се најкритични од аспект на загроеноста на изолацијата од атмосферските пренапони па е затоа препорачливо првичните проценки на степенот на загроеноста на изолацијата да се врши со ваквиот облик, па дури подоцна деталните анализи, онаму каде што е потребно, да се вршат со некој од претходно наведените модели на струјниот бран.

## 5.2. МОДЕЛ НА КАНАЛОТ НА ГРОМОТ

Како што претходно беше споменато каналот на громот се моделира со (бесконечно) долг вод со карактеристична импеданција  $Z_g$  по кој наидува упадниот пренапонски бран  $U_{up}(t)$ :

$$U_{up}(t) = \frac{Z_g \cdot I_g(t)}{2} . \quad (5.12)$$

Во релацијата (5.12) се воведени следните означувања:

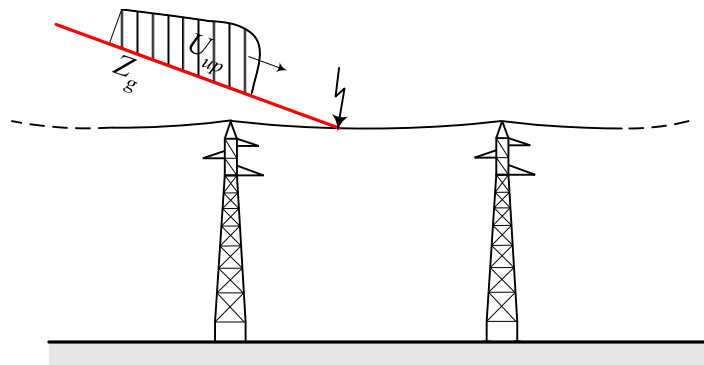
$I_g(t)$  – струја на струјниот бран на атмосферското празнење;

$U_{up}(t)$  – упадна компонента на напонскиот бран што се простира по каналот на громот;

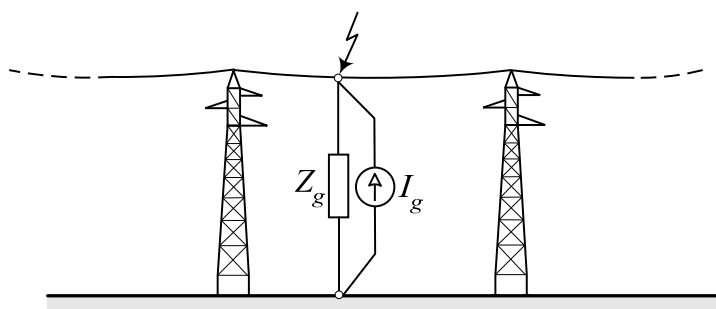
Статистичката распределба на амплитудите на струјата на громот се добива врз основа на мерењата на струите при атмосферско празнење во добро заземјените објекти. Кај нив, поради тоталната рефелксија на струјниот бран, упадната компонента на струјниот бран е за приближно два пати помала од регистрираната струја во добро заземјениот објект.

Брановата импеданција на каналот на громот  $Z_g$  има вредност која обично се движи во границите од 100 до 500  $\Omega$  (или во просек 300  $\Omega$ ), кога се работи за релативно големи струи. За празнења со мали амплитуди на струјата таа е значително поголема и достигнува дури и вредности од 3000  $\Omega$ .

Типичната заменска шема на атмосферското празнење е прикажана на сликите 5.6а и 5.6б. На сликата 5.6а празнењето е претставено со каналот на громот  $Z_g$  по кој упаѓа упадниот бран  $U_{up}(t)$ , додека на сликата 5.6б, атмосферското празнење е моделирано со струен генератор  $I_g(t)$  кој што ја инјектира својата струја на местото на ударот. Паралелно на струјниот генератор  $I(t)$  е поставен отпорник со отпорност еднаква на импеданцијата на каналот на громот  $Z_g$ .



Слика 5.6 а. Моделирање на ударот на гром во електроенергетските објекти



Слика 5.6 б. Моделирање на ударот на гром во електроенергетските објекти

За удари на громот во заземјените делови на постројките, во громобраните, во заштитните јажиња како и за удари во фазните спроводници од СН надземните водови кои не се снабдени со заштитни јажиња, обично се работи за струи со вообичаени амплитуди од редот на големина 10 или повеќе kA. Во таквите случаи може да се усвои дека импеданцијата на каналот на громот изнесува  $Z_g = 300 \Omega$ . Но за директни удари на громот во фазните спроводници на надземен вод покрај заштитното јаже, кога само малите струи можат да ја "пробијат" заштитата, може да се усвои дека импеданцијата на каналот на громот е десетина пати поголема и има вредност од редот на големина  $Z_g = 3000 \Omega$ . Треба да се нагласи дека случајот кога импеданцијата  $Z_g$  е голема е понеповолен од случајот кога  $Z_g$  има вообичаени вредности  $200 \div 300 \Omega$ .

### 5.3. МОДЕЛИРАЊЕ НА СПРОВОДНИЦИТЕ И НА ЗАШТИТНИТЕ ЈАЖИЊА

#### *Моделирање на заштитното јаже*

Заштитното јаже во распонот  $a$  се моделира со вод со должина  $l = a$ , чија што карактеристична импеданција  $Z_{zj}$  изнесува:

$$Z_{zj} = 60 \cdot \ln \frac{4H_{zj.ef}}{d_{zj}} \quad (\Omega). \quad (5.13)$$

Во (5.13) со  $d_{zj}$  е означен пречникот на јажето, додека со  $H_{zj.ef}$  е означена "ефективната" височина на јажето над земјата. Притоа, ако со  $H_{st}$  ја означиме височината столбовите, а со  $f_{zj}$  го означиме провесот на заштитното јаже, важи:

$$H_{zj.ef} = H_{st} - \frac{2}{3} \cdot f_{zj}. \quad (5.14)$$

Со изразот (5.14) се зема предвид фактот дека висината на јажето над земјата во разни точки од распонот е различна.

Короната на јажето, што претставува типична појава за време на атмосферските пренапони, го зголемува еквивалентниот пречник на јажето и на тој начин врши намалување на неговата импеданција за 20 до 30% во однос на онаа добиена со (5.13) за нормални услови.

#### *Моделирање на фазните спроводници*

Фазните спроводници се моделираат на наполно ист начин како и заштитното јаже. Според тоа изразот за пресметување на брановата импеданција  $Z_{pr}$  на водот со кој што се еквивалентира фазниот спроводник има облик:

$$Z_{pr} = 60 \cdot \ln \frac{4H_{pr.ef}}{d_{pr}} \quad (\Omega). \quad (5.15)$$

$$H_{pr.ef} = H_{pr} - \frac{2}{3} \cdot f_{pr} \quad (5.16)$$

( $H_{pr}$  и  $f_{pr}$  се височина на обесување и провес на фазниот спроводник).

Разлика постои само во случајот кога "спроводникот" претставува сноп од  $n$  јажиња, што е типично за преносните водови со номинален напон  $U_n \geq 345 \text{ kV}$ . Кај нив наместо пречникот на јажето  $d_{pr}$  во релацијата (5.15) ќе фигурира "еквивалентниот пречник"  $d_{ek}$ , кој што се пресметува со помош на изразот (5.17):

$$d_{ek} = 2 \cdot \sqrt[n]{(d_{pr} / 2) \cdot R_{сноп}^{n-1}}. \quad (5.17)$$

во кој со  $R_{сноп}^n$  е означен радиусот на опишаниот круг околу "снопот" формиран од спроводниците.

Ефектот на појавата на корона и кај фазните спроводници се манифестира на сосема ист начин како и во претходниот случај со "зголемување" на пречникот на спроводникот и со намалување на карактеристичната импеданција на спроводникот од (5.15) за 20 до 30%.

#### 5.4. МОДЕЛИРАЊЕ НА СТОЛБОВИТЕ ОД НАДЗЕМНИТЕ ВОДОВИ

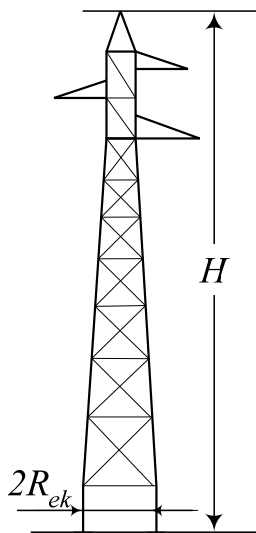
Во пресметките на брановите процеси што се одвиваат при удар на гром на надземните водови неопходно е да се земе предвид и учеството на столбовите од самите водови, кои во импулсниот период се владеат како "куси" водови чија што должина  $l_{ST}$  е за околу 15% поголема од нивната височина  $H_{ST}$  и импеданција  $Z_{ST}$ , чија што вредност зависи од нивната конструкција и напречни димензии:

$$l_{ST} \approx 1,15 \cdot H_{ST} . \quad (5.18)$$

Последната релација е последица на фактот што брзината на простирање на брановите долж столбовите е за околу 15-тина проценти помала од брзината на светлината, т.е.  $v_{ST} \approx 0,85v_0$ .

Во стручната лиетратура се среќаваат бројни изрази за пресметување на карактеристичната импеданција на столбовите од надземните водови. Меѓу првите формули коишто се појавиле во литературата е онаа според која столбот се моделира со конус, а подоцна се појавил и многу поедноставниот модел според кој столбот се "еквивалентира" со еден цилиндар со височина  $H$  и полупречник  $R$ . Во тој случај импеданцијата на столбот се пресметува со помош на изразот (5.19):

$$Z_{ST} = 60 \cdot \left[ \ln \frac{2\sqrt{2H}}{R} - 2 \right] (\Omega). \quad (5.19)$$



Слика 5.7а. Челично-решеткаст столб тип "Елка"

Доколку сакаме да го опфатиме ефектот на промена на напречните димензии на столбот со неговата висина, тогаш столбот можеме да го замислиме како низа од  $n_s$  каскадно поврзани еквивалентни цилиндри со различни полупречници  $R_i$  и различни импеданции  $Z_i$ , па во тој случај би имале:

$$Z_{ST} = \sum_i Z_i / n_s . \quad (5.20)$$

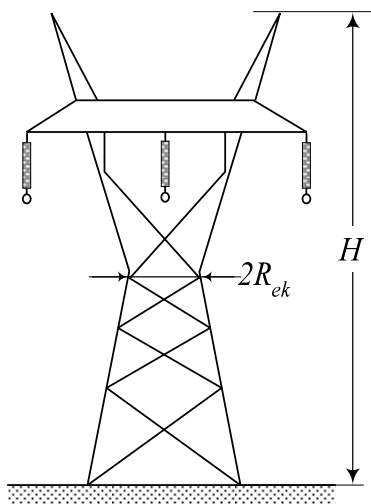
Од практичен аспект многу поповолна е примената на релацијата (5.21) која исто така се користи прилично често кај ваквите пресметки кога се работи за столбови од типот "елка" (слика 5.7а).

$$Z_{ST} = 30 \cdot \ln \left[ \frac{2 \cdot (H^2 + R^2)}{R_{ek}^2} \right] (\Omega). \quad (5.21)$$

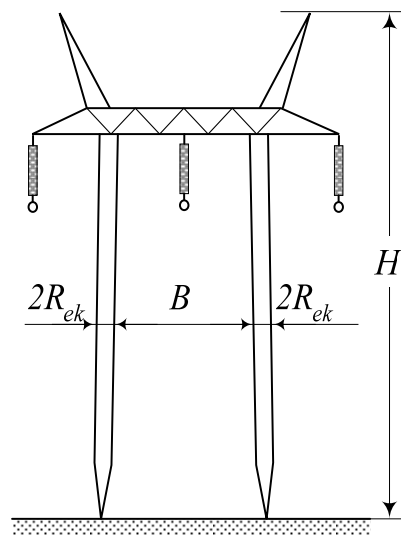
Во последната релација со  $R_{ek}$  е означен "еквивалентниот" полупречник на столбот во неговата основа на ниво на земјата (столб тип "елка" од сл. 5.7).

Доколку се работи за столб тип Y ("ипсилон"), како на сликата 5.7б, тогаш пресметката на брановата импеданција на столбот се врши со помош на релацијата (5.22) со  $R_{ek}$  е означен "еквивалентниот" полупречник на столбот на неговото најтесно место.

$$Z_{ST} = 60 \cdot \left[ \ln \frac{2H\sqrt{2}}{R_{ek}} - 1 \right] (\Omega). \quad (5.22)$$



Слика 5.7 б. Челично-решеткаст столб тип "Y" ("ипсилон")



Слика 5.7 в. Портален челично-решеткаст столб

За порталните столбови (сл. 5.7в) е потребно да се познава не само височината  $H$  и еквивалентниот радиус  $R_{ek}$  на секој негов крак туку и растојанието  $B$  помеѓу нив за да може да се пресмета најнапред сопствената импеданција  $Z_S$  на секој крак а потоа и нивната заемна импеданција  $Z_M$ :

$$Z_S = 60 \cdot \ln \frac{H}{R_{ek}} + 90 \cdot \frac{R_{ek}}{H} - 60; \quad Z_M = 60 \cdot \ln \frac{H}{B} + 90 \cdot \frac{B}{H} - 60; \quad (5.23)$$

$$Z_{ST} = \frac{Z_S + Z_M}{2}. \quad (5.24)$$

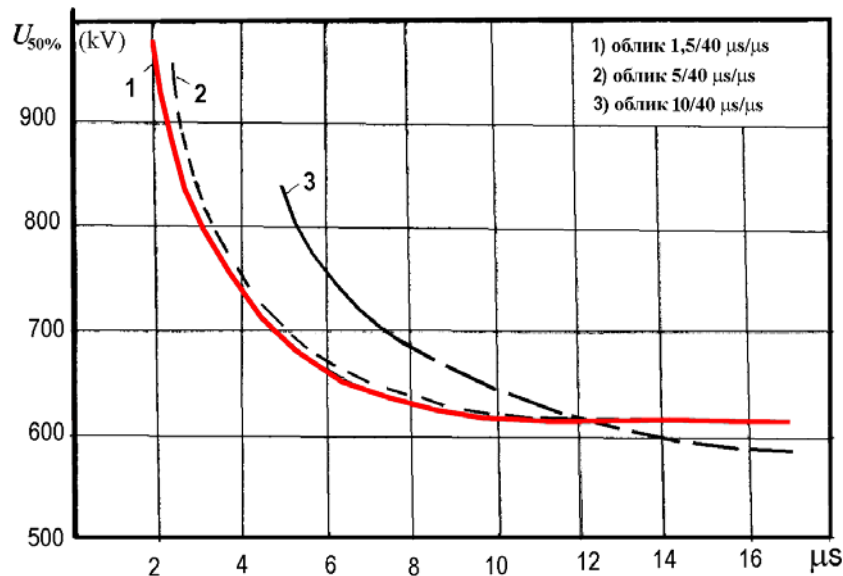
## 5.5. МОДЕЛИРАЊЕ НА ПРЕСКОКОТ НА ИЗОЛАЦИЈАТА НА ВОДОТ

Еден од најважните фактори во пресметките на пренапоните и ризикот од прескок на изолацијата при атмосферското празнење кој значително влијае врз резултатите од пресметките е моделот на прескочната карактеристика на изолацијата. Во литературата се среќава голем број разновидни модели на изолацијата и секој од нив воведува определени апроксимации во пресметките.

Зависноста на 50% прескочен напон од времето до прескокот за стандардниот облик на напонскиот ударен бран  $1,2/50 \mu s/\mu s$  на една изолациона конструкција се нарекува волт-секундна карактеристика на изолацијата или  $V-t$  крива. Наједноставен начин за нејзиното определување е нејзиното добивање по експериментален пат. Притоа под 50% прескочен напон се подразбира амплитудата на напонскиот бран која после поголем број повторени удари на непроменетата конфигурација на електродите ќе предизвика во 50% од случаите прескок на изолацијата.

$V-t$  кривата се добива во лабораториски услови со испитување на изолацијата со стандарден ударен атмосферски бран кој има непроменет облик но со различни вредности на неговата амплитуда. Ваквите испитувања се долготрани и скапи бидејќи бараат повторување на експериментот голем број пати за да се определи доволно точно 50% прескочен напон. Доколку се располага со експерименталните резултати тогаш за самите пресметки на ризикот од прескок може да се користи оваа карактеристика ако таа се прикаже во форма на искршена линија која ќе ги поврзува експериментално добиените точки. Обично е доволно да се знаат 5 до 6 такви точки од експериментално добиената  $V-t$  крива за да се добие резултат од пресметките со прифатлива точност.

На сликата 5.8 е прикажана волт-секундната карактеристика на една 110 kV изолаторска верига добиена експериментално со напонски испитувања со ударни напонски бранови со различни облици.



**Слика 5.8. Волт–секундна карактеристика на 110 kV изолаторска верига за различни облици на импулсниот испитен напон:**

1) облик 1,5/40  $\mu\text{s}/\mu\text{s}$ ; 2) облик 5/40  $\mu\text{s}/\mu\text{s}$  и 3) облик 10/40  $\mu\text{s}/\mu\text{s}$

Од сликата 5.8 е сосема јасно дека обликот на  $V-t$  кривата на една изолација ќе зависи од обликот на пренапонскиот бран којшто ја напрега изолацијата. Но заради поедноставување на пресметките, тие обично се вршат со  $V-t$  кривата која што се однесува на стандардниот облик на бранот што веќе претставува едно упростување односно апроксимација бидејќи во системот може да се јават импулсни пренапони со разни облици кои можат и битно да се разликуваат од стандардниот облик.

Покрај тоа од прикажаната слика 5.8 може да се воочи дека 50% прескочен напон  $U_{50\%}$  за мали времиња на прескок, кои се добиваат со примената на многу стрмни бранови, има многу високи вредности. За разлика од нив, примената на пренапонски бранови кај кои порастот на напонот е спор дава помали вредности на 50% прескочен напон а и промената на  $V-t$  зависност  $U_{50\%}(t)$  на изолацијата во доменот на големите времиња на прескок е прилично мала.

Во нумеричките пресметки на импулсните преодни процеси прашањето дали ќе дојде до прескок на изолацијата за време на самиот процес или не, се утврдува така што за секој момент од преодниот процес се испитува дали напонот што ја напрега изолацијата  $U_{iz}(t)$  станал поголем од вредноста што ја дава нејзината волт-секундна карактеристика за тој момент, т.е. дали кривите  $U_{iz}(t)$  и  $U_{50\%}(t)$  воопшто се сечат во текот на преодниот процес. Доколку во некој момент  $t_p$  дошло до прескок, т.е. доколку е  $U_{iz}(t_p) \geq U_{50\%}(t_p)$ , тогаш во тој момент дошло до "спојување" на крајните точки од изолацијата што обично се симулира со вметнување на кус вод чија што должина е приближно еднаква на должината на изолаторската верига  $l_{iz}$  а брановата импеданција е еднаква на брановата импеданција на самата конзола од столбот. На тој начин при прескок на фазната изолација од фазата на еден надземен вод, на пример, конзолата директно ќе се спои со фазниот спроводник кај кој што настанал прескокот. Притоа треба да се нагласи дека времето на процесот се мери од оној момент кога пренапонот стигнал до разгледуваната изолација.



Вака дефинирианиот модел на прескок на изолацијата е донекаде идеализиран бидејќи во практиката е можно до прескок на изолацијата да дојде и при пренапон кој е понизок од  $U_{50\%}$  на изолацијата – и обратно, што значи дека се работи за еден случаен, а не детерминиран, процес.

### 5.5.1. Аналитички облик на $V-t$ карактеристика на изолацијата $U_{50\%}(t)$

Волт-секундната карактеристика на изолацијата кај изолаторските вериги од надземните водови може да се опише со помош на една хипербола од обликот (5.25):

$$U_{50\%}(t) = K_1 + \frac{K_2}{t^{(3/4)}}, \quad (5.25)$$

каде што константите  $K_1$  и  $K_2$  зависат од меѓуелектродното растојание  $d$  на изолацијата според следните изрази:

$$K_1 = 400 \cdot d; \quad K_2 = 710 \cdot d \quad (\text{kV}). \quad (5.26)$$

Во (5.26) меѓуелектродното растојание  $d$  на изолаторот се изразува во (m) и притоа за константите  $K_1$  и  $K_2$  се довиваат вредности во (kV). Времето  $t$  во (5.25) се изразува во ( $\mu\text{s}$ ).

Постојат и други изрази кои на сличен начин ја опишуваат зависноста  $U_{50\%}(t)$ . Еден од нив е изразот (5.27):

$$U_{50\%}(t) = K_1 \cdot \left( 0,867 + \frac{1,331}{t} \right), \quad (5.27)$$

Сепак, обликот од (5.25) се смета за поточен и како таков тој веќе подолго време се препорачува од страна на работната група на здружението IEEE да се користи во пресметките на ризиците за прескок кај надземните водови.

## 5.6. МОДЕЛИРАЊЕ НА ОПРЕМАТА ВО ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТСКИТЕ ПОТРОЈКИ

### 5.6.1. Моделирање на опремата со кондензатори (капацитети)

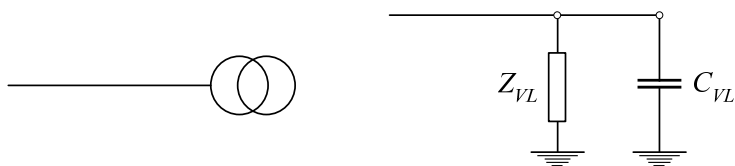
При анализата на преодните процеси во високонапонските постројки до кои доаѓа при упад на пренапонски бран по некој од приклучните водови неопходно е секој од нејзините елементи да се моделира на соодветен начин. Елементите на постројките кои активно учествуваат на деформацијата на пренапонските бранови при нивното простирање, а со тоа и на текот на самиот преоден процес, се следните:

- енергетските трансформатори;
- напонските и струјните мерни трансформатори;
- прекинувачите;
- раставувачите (разделувачите);
- собирниците;
- одводниците на пренапони и
- потпорните и спроводните изолатори како и изолаторските вериги.

Сите од споменатите елементи, освен одводниците на пренапони, се моделираат во споменатите анализи со својот влезен капацитет. Понекогаш енергетските и мерните трансформатори се моделираат и со модел во кој покрај влезниот капацитет фигурира и активна отпорност еднаква на брановата импеданција на намотката од трансформаторот, приклучена паралелно на влезниот капацитет.

На сликата 5.9 е прикажана една таква заменска шема. Таа е доволно точна само за анализа на преодните процеси во разводната постројка, додека за анализите на процесите

внатре во самиот трансформатор е неопходно да се користат многу посложени шеми. Во тие шеми освен сопствените и меѓусебните индуктивности на намотките, фигурираат уште и сопствените и меѓусебните капацитивности на намотките како и капацитивностите помеѓу одделните навивки на самите намотки.



**Слика 5.9. Заменска шема за енергетски или мерен трансформатор**

Во табелата 5.1 се прикажани типичните вредности на влезните капацитети на енергетските трансформатори, преземени од соодветна стручна литература. Овие податоци може да се користат во пресметките доколку не е познат соодветниот податок за влезниот капацитет од самиот производител на трансформаторот. Во табелата 5.2, пак, се прикажани ориентационите вредности на влезните капацитети на останатите елементи од високонапонската опрема во електроенергетските постројки.

**Табела 5.1. Типични вредности на влезните капацитети на енергетските трансформатори во зависност од номиналниот напон**

Номинален напон (kV)	Влезна капацитивност на трансформаторот (pF)
35	800
110	800
220	1500 ÷ 2000
330	3000
500	4000
750	5000

**Табела 5.2. Типични вредности на влезните капацитети на високонапонската опрема во разводните постројки**

Назив на опремата	Карактеристики на опремата	Капацитивност (pF)	Средна вредност (pF)	Бранова импеданција (kΩ)
Енергетски трансформатори	голема моќност	1000 ÷ 3000	1500	3 ÷ 10
Енергетски трансформатори	мала моќност	300 ÷ 1000	800	3 ÷ 10
Напонски трансформатори	индуктивни	200 ÷ 500	300	
Напонски трансформатори	капацитивни, ВН	1600 ÷ 2000		
Струјни трансформатори		200 ÷ 700		
Прекинувачи	затворена оложба	300 ÷ 800	500	
Прекинувачи	отворена положба	200 ÷ 500	300	
Разделувачи	затворена положба	40 ÷ 80	60	
Разделувачи	отворена положба	30 ÷ 60	40	
Проводни изолатори		100 ÷ 300	200	

## 6. ЗАЗЕМЈУВАЧИ НА ЕЛЕМЕНТИТЕ ОД ЕЕС

### 6.1. ЗАЗЕМЈУВАЧИ НА СТОЛБОВИТЕ ОД НАДЗЕМНИТЕ ВОДОВИ

#### 6.1.1. Општо за заземјувањето на надземните водови

Заземјувачот на столбот од еден надземен вод се состои од множество неизолирани и меѓусебно галвански споени метални елементи (хоризонтални и вертикални електроди), коишто се закопани во земјата така што со неа остваруваат добар електричен контакт. Како елементи од заземјувачот на столбот, секако, се вбројуваат и самите армирано–бетонски темели на столбовите од далекуводите, коишто претставуваат "природни заземјувачи" на столбот. Во услови на тло со добра електрична спроводност ( $\rho \leq 300 \Omega\text{m}$ ) самите темели на столбот се често пати доволни да ја извршат функцијата на заземјување на столбот.

Заземјувачот на еден столб има две основни задачи:

1. успешно да ја одведе струјата на громот во земјата кога ќе дојде до директно атмосферско празнење во надземниот вод, без да дојде до појава на повратен прескок и
2. во случајот на доземен спој (еднофазна куса врска), настанат на водот, тој има задача струјата на земјоспој, која уште се нарекува и "струја на грешка" да ја спроведе во земјата, така што на површината од земјата да не се појават потенцијали што ќе го загорзат животот на луѓето и животните коишто можат да се најдат во непосредна околина на самиот столб.

Споменатите две барања ги дефинираат и рамковните задачи на заземјувачите на столбовите од надземните водови и тие треба да бидат исполнети во што е можно поголема мера.

Од обете причини заземјувачот треба да има што е можно помала преодна отпорност према земјата која, како што беше претходно кажано, се нарекува уште и "отпорност на распростирање" на заземјувачот. Покрај смалувањето на ризикот од повратен прескок и опасностите од појава на опасни напони на допир и чекор, тука треба да се спомене потребата од остварување ниска преодна отпорност за потребите на самата релејна заштита на водот (ако е таа предвидена) бидејќи со ниската преодна отпорност треба да обезбеди струјата на грешка да задржи доволно висока вредност заради правилното дејствување на релејната заштита.

Основни карактеристики на секој заземјувач се:

- отпорноста на распростирање  $R_Z$  за наизменична струја;
- максималната потенцијална разлика на допир  $E_{d,\max}$  ;
- максималната потенцијална разлика на чекор  $E_{c,\max}$  ;
- импулсната отпорност на распростирање  $R_i$  за импулсни струи, каква што е струјата на громот.

Овие карактеристики зависат од димензиите и геометријата на заземјувачот, но и од карактеристиките на почвата (нејзината структура, специфична отпорност  $\rho$  и др).

Основна задача на проектирањето и димензионирањето на заземјувачите на столбовите е при однапред позната струја на одведување во земјата  $I_Z$  (т.е. зададена веројатност за повратен прескок  $P_0$ ) и позната специфична отпорност на тлото  $\rho$ , да се избере заземјувач со облик и димензии такви што тој ќе ги задоволи техничките ограничувања дефинирани со мерките за безопасност, а во исто време ќе биде и економичен. Од тука произлегува заклучокот дека изборот и димензионирањето на заземјувачите, во општ случај, е сложена техничко-економска задача, чиешто решение треба да претставува оптимален компромис помеѓу техничките барања наметнати со прописите, потребите за сигурност и барањата за економичност.

Под терминот решавање на заземјувач се подразбира определување на отпорноста на распростирање  $R_z$  т.е. одредување на потенцијалот  $U_z$  на кој доаѓа заземјувачот и заземјените метални делови, како и определување на распределбата на потенцијалите по површината на земјата во негова близина, а во тој контекст и одредување на потенцијалните разлики  $E_d$  и  $E_c$ .

### **6.1.2. Осврт кон прописите за заземјување на столбовите. Технички препораки. Постојна практика**

Техничките прописи и препораки 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. Одредбите од прописите се, според тоа, насоки во согласност со кои се врши изборот и димензионирањето на заземјувачите.

#### ***Правилник за техничките нормативи за изградба на надземни електроенергетски водови***

Со постојниот "Правилник за техничките нормативи за изградба на надземни електроенергетски водови со номинален напон од 1 kV до 400 kV" (Сл. лист на СФРЈ бр. 65/1988) се определени, но недоволно прецизно, начините на изведување на заземјувачките системи (ЗС) на надземните водови. Досегашниот традиционален начин за избор на ЗС се темелеше единствено на интуицијата и инженерското искуство на проектантот и притоа отсутствуваше нормирањето на ризикот за испад на надземниот вод под дејство на атмосферските празнења. Исто така не се водеше сметка за вредноста на специфичната отпорност на тлото по должината на трасата од надземниот вод, а наедно со тоа отсутствуваше и било каква оптимизација на цената на чинењето на ЗС.

#### ***Услови за избор на заземјувачкиот систем на НВ со оглед на земните споеви***

При изборот на заземјувачите со оглед на струјата на земен спој, односно еднофазна куса врска, задача на изборот е да се постигнат услови за безопасност во поглед на можностите за појава на опасни напони на допир и чекор во непосредната околина на столбот при појава на земен спој/куса врска. Според членот 77 од Правилникот, надземните водови што и' припаѓаат на мрежа со ефикасно заземјена неутрална точка (а тоа се кај нас сите високонапонски водови  $U_n \geq 110$  kV, па според тоа и разгледуваниот) мораат да имаат уреди за брзо автоматско исклучување при земјоспој, кои сигурно ја исклучуваат делницата во дефект и така ја отстрануваат опасноста од дејството на напонот на местото на земјоспојот. Во тој случај, според членот 78, околу секоја стопа од расчленетиот темел на столбот ќе биде потребно да се постави по еден или два прстена со најмала длабочина на вкопување од 0,5 m. Доколку се предвидува поставување и на уште еден дополнителен прстен (контура) околу сите 4 стопи на темелот, тогаш според овој член, неговата големина и позиција во однос на стопите од темелот треба да биде таква што ќе се постигне поволно обликување на потенцијалот.

Според членот 80 од Правилникот, во поглед на заштитата од опасен напон на местото на земјоспојот, доколку е водот снабден со уреди за брзо автоматско исклучување на земјоспојот, тогаш отпаѓа потребата да се преземаат други посебни мерки, освен претходно споменатите. Значи, напоните на чекор и допир ниту во еден случај не се поставуваат како критериум за избор и димензионирање на ЗС на водот, т.е. самата мерка на брзо автоматско исклучување на земниот спој и обликувањето на потенцијалот околу столбот со помош на прстените се сметаат за доволни мерки на сигурност со кои се елиминира опасноста од овој вид.

Кога надземниот вод не е снабден со уреди за брзо автоматско исклучување на земјоспојот како и во мрежи со незаземјена (изолирана) неутрална точка или неутрална точка заземјена преку придушница, каде што траењето на земјоспојот може да биде и подолго, отпорноста на распростирање  $R_z$  на заземјувачите кај столбови на обработливи површини, покрај прометни патишта и во населени места, според Правилникот, не смее да биде поголем од:

$$R_z \leq \frac{U_z}{I_z}, \quad (6.1)$$

каде што е  $U_z = 125 \text{ V}$  најголем дозволен напон на столбот, додека  $I_z$  е струја што се одведува во земјата на местото на земјоспојот.

Се покажува дека во многу ситуации што се среќаваат на теренот овој услов е премногу тешко да да биде исполнет. Условот (6.1) е рецидив од минатото кога се немало доволно сознанија за природата на електротрауматизмот и за реалните опасности сврзани со него и веројатно е во сила уште само во Република Македонија. Тој не претставува реален одраз на опасностите од превисоките напони на допир и чекор и не води кон рационален избор и димензионирање на заземјувачите од столбовите на надземните водови. Затоа е неопходно да се изврши негова ревизија и преиспитување после кое тој најверојатно ќе биде заменет со нов, значително полиберален и порационален критериум.

### ***Услови за избор на заземјувачкиот систем на НВ со оглед на атмосферските празнења***

При удар на гром во столбот или во заштитното јаже, се јавува опасност од појава на повратен прескок<sup>1</sup>. За да се сведе оваа опасност на прифатлива мерка, неопходно е, според Правилникот, зависно од степенот на изолацијата на водот, да се одреди максимално дозволената отпорност на заземјување. При ова треба да се земаат предвид и зачестеноста на атмосферските празнења и јачината на струјата на громовите, доверливоста во работењето на водот што треба да се постигне, како и трошоците за изведување на заземјувањето.

Значи, основна задача на заземјувачите на столбовите според овој критериум е да се спречи или да се намали веројатноста за појава на повратен прескок на изолацијата при удар на гром во столбот или во заштитното јаже. Притоа, степенот на постигнатата сигурност, т.е. нивото на доверливо работење на водот со оглед на атмосферските пренапони треба да биде компромис помеѓу потребите од сигурност во погонот и цената на чинење на водот. Тој во голема мера зависи од степенот на загрозеност на водот од атмосферските пренапони, од една, и од неговата важност во електроенергетскиот систем, од друга страна.

Правилникот [13] во оваа смисла значително го упростиува проблемот и од тие причини може да се смета дека денес е тој на извесен начин надминат. Имено, според членот 83, се смета дека повратен прескок не е веројатен ако за големината на отпорноста на распростирање на заземјувањето е исполнет следниот услов:

---

<sup>1</sup> **Повратен прескок (backflash)** е појава што се јавува при директните атмосферски празнења во столб или во заштитно јаже во близина на столбот од надземниот вод. Кога импулсната струја на громот  $I_i$  е голема или, пак, кога струјата  $I_i$  има вообичаена големина но импулсната отпорност на столбот  $R_i$  е голема, под дејство на атмосферското празнење во столбот доаѓа до подигање на неговиот потенцијал на вредност која што ја надминува импулсната цврстина на неговата изолација, тнар. "поднослив напон"  $U_{podn}$ . Тогаш доаѓа до прескок на изолаторот – појава наречена "повратен прескок".

$$R_z = \frac{U_{\text{подн}}}{I_M}, \quad (6.2)$$

каде што е:

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

$U_{\text{подн}}$  поднослив ударен напон на изолацијата на посматраниот столб, во суво; (во текстот на Правилникот означен со  $U_i$ )

$I_M$  темена вредност (амплитуда) на ударната струја на громот за посматраниот столб (во текстот на Правилникот означен со  $I_u$ )

При изборот на пресметковната темена вредност на струјата  $I_m$ , според Правилникот, како ориентација можат да послужат вредностите дадени во табелата 6.1, кои покажуваат со колкава веројатност (изразена во проценти), амплитудата на струјата на громот нема да ја надмине вредноста, наведена во првата редица на оваа табела.

**Табела 6.1. Распределба на амплитудите на струјата на громот, според Правилникот**

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

Основа за усвојување на темената вредност на ударната струја  $I_M$  со која ќе се врши димензионирањето на заземјувачите, според Правилникот, се податоците со кои се располага за зачестеноста на атмосферски празнења и бројот на деновите со грмежи  $T_d$  во годината или, пак, густината  $N_g$ , т.е. годишниот број на удари на гром на  $1 \text{ km}^2$ .

Така, на пример, од оваа табела следува дека со 95% сигурност можеме да очекуваме дека амплитудата на струјата на громот нема да ја надмине вредноста од  $I_m = 40 \text{ kA}$ . Ако земеме дека подносливиот ударен напон на основната изолација на еден надземен вод изнесува  $U_{\text{подн}} = 496 \text{ kV}$ , (што е вообичаено за основната изолација на повеќето  $110 \text{ kV}$  водови во Р. Македонија), тогаш, од релацијата (6.1) следува дека доколку вредноста на отпорноста на распростирање на заземјувачот изнесува  $R_z < U_{\text{подн}} / I_M = 496/40 = 12,4 \ \Omega$ , тогаш со ризик од само 5% можеме да очекуваме дека при удар на гром во столбот нема да дојде до повратен прескок, т.е. можноста за повратен прескок во тој случај е практично елиминирана.

Од увидот во посовремената стручна светска литература може да се констатира дека табелата 6.1, која според нашиот Правилник е основа за димензионирање на заземјувачите на столбовите од надземните водови, е базирана на многу стари сознанија за големината на струјата на громот. Таа дава значително пониски вредности за струјата на громот отколку што денес се смета за реално, и дава премногу "оптимистичка" слика за разгледуваниот проблем. Затоа е препорачливо за таа цел да се користат табели со други, посовремени, податоци каков што е, на пример општоприфатениот дијаграм од сликата 6.1, односно табелата 6.2.

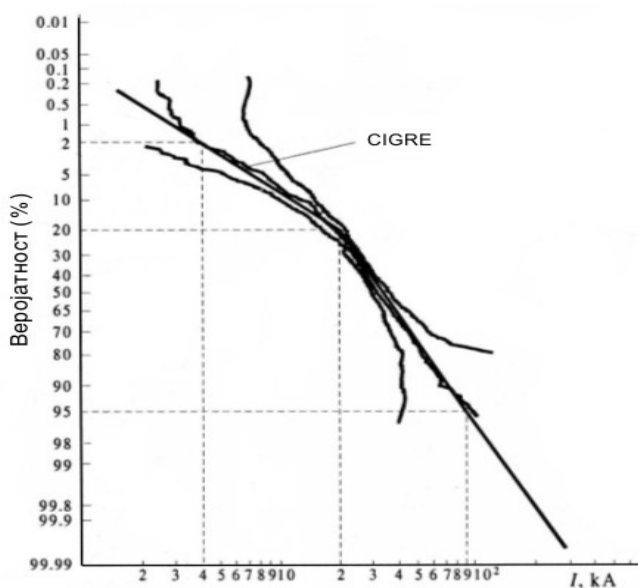
Според најновите сознанија кумулативната веројатност<sup>2</sup>, како што обично се нарекува резултантната распределба на амплитудата на струјата на громот на првиот надолен удар со

<sup>2</sup> Кумулативната веројатност се дефинира преку тнар. "функција на распределба" на случајна променливата величина. Функцијата на распределба  $F(x)$  на една случајна променлива величина  $x$  се дефинира на следниот начин:  $F(X) = \int_{-\infty}^X f(x) \cdot dx$  каде што  $f(x)$  е таканаречената "густина на веројатноста" на случајната променлива  $x$ . Таа ја дава веројатноста случајната променлива  $x$  да не ја надмине вредноста  $X$ , т.е.  $P(x < X)$ .

негативен поларитет (80 – 90% од сите надолни удари се негативни), е прикажана на сл. 6.1. На апсцисната оска од оваа слика е нанесена големината на амплитудата на струјата на громот (kA) во логаритамски размер додека на ординатната оска е нанесена веројатноста, изразена во (%), струјата на громот при едно празнење да не ја надмине вредноста отчитана од апсцисната оска. Оваа веројатност е нанесена во скалата на нормалниот (Гаусов) закон на распределба.

Табела 6.2. Функција на распределба на струјата на громот според CIGRE – распределбата

Струја $I_M$ , kA	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Веројатност, %	7	20	48	66	78	85	89	92	94	96



Сл. 6.1. Кумулативна веројатност на распределба на струјата на громот со негативен поларитет (CIGRE – распределба)

Вака упростениот начин на определувањето на ризикот за појава на повратен прескок со помош на критериумот (6.1) и табелите (6.1) односно (6.2) е, секако, за подетални анализи, неприфатлив. Тој може да се применува само за ориентациони проценки при прелиминарните анализи на разните можни варијанти на заземјувачките системи. Кога се работи за високонапонски водови, особено за водови што се од особено значење за работата на електроенергетскиот систем, пресметките на ризикот за појава на повратен прескок треба да се вршат со други, посовремени методи, кои покрај уважувањето на стохастичкиот карактер на параметрите на громот, водат сметка и за многу други појави што се случуваат при атмосферските празнења.

Функцијата  $Q(x) = 1 - F(x)$  е комплементарната функција на  $F(x)$  и ја дава тнар. "кумулативна веројатност", т.е. веројатноста случајната променлива  $\mu$  да ја надмине вредноста  $X$ , т.е.  $P(x \geq X)$ .

### *Техничка препорака ТП-9*

Секоја земја си изготвува технички препораки за решавање на техничките проблеми во разни области од стопанството. Техничките препораки се во принцип договорни правила на однесување и насоки на дејствување, теориски докажани и практично проверени. Тие од една страна водат сметка за техничката сигурност и исправност, условите за безбедност и сл, а од друга, водат сметка и за економичноста и рационалноста на применетото решение. Кога зборуваме за заземјување на столбовите од надземните водови кај нас во континуитет се применуваат одредбите од Техничката препорака бр. 9 на Електростопанството на Србија (ЕПС). Ова препорака се однесува на изведбата на заземјувањето и на заземјувачите на столбовите на надземните електроенергетски водови за напон 1, 10, 20, 35, и 110 kV. Таа е усогласена со постојните важечки македонски прописи и стандарди, и претставува еден вид збирка од насоки, корисни за практична примена.

#### *Основни технички услови за изведување на заземјувањето на столбовите според ТП-9*

Според оваа препорака металните и армиранобетонските столбови треба да се заземјат и притоа за секој столб треба да се изведе посебен заземјувач. За столбовите од дрво или од некој друг изолационен материјал не се изведуваат посебни заземјувачи освен во случаите кога тие се снабдени со заштитно јаже, метална лента за заштита од удар на гром, одводници на пренапони и слично. Металните конзоли на овие столбови како и металните основи на линиските разделувачи не се заземјуваат.

Заземјувачите на столбовите од надземните водови се положуваат во земјата на длабочина од околу 0,7 m. Кај заземјувачите составени од два прстена, првиот прстен се поставува на длабочина од 0,7 m и на растојание 1 m од телото на столбот, додека вториот се поставува на длабочина од 1 m и на растојание од најмалку 2 m од телото на столбот.

Заземјувачите се изведуваат со еден или повеќе прстени, во форма на ѕвезда со повеќе краци (зракасти заземјувачи) или пак се изведуваат како некоја нивна комбинација.

Прстенестите заземјувачи можат да бидат направени од еден или од два прстена и имаат предност во услови на ограничен простор, како и во сите случаи каде треба да се земе предвид заштитата од превисок напон на допир.

Зракастите заземјувачи се изведуваат со четири краци, додека на места со ограничен простор, тие се изведуваат со три, односно два крака. Тие имаат предимство пред прстенестите заземјувачи кај водовите кои се наоѓаат на терени со силни и зачестени атмосферски празнења, особено кај водовите со кои се врши радијално напојување на важни потрошувачи. Се применуваат и за заземјување на столбните места на кои се наоѓаат одводници на пренапони.

Како материјал за изведување на заземјувачите треба да се користи округла поцинкувана челична жица со дијаметар 10 mm. Дозволено е користење на поцинкувани челични ленти со пресек од најмалку 100 mm<sup>2</sup>, 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 mm<sup>2</sup>.

#### *Основни критериуми за димензионирање на заземјувачите на столбовите*

Според Препораката ТП-9 основен критериум за димензионирање и изведба на заземјувачите од надземните водови е заштитата на водот од повратни прескоци при удари на гром во столбот или во заштитното јаже. Во посебни случаи треба да се задоволи и критериумот за заштита од превисоки напони на допир.



Според оваа препорака се смета дека е постигнато задоволително ниво на заштита од повратни прескоци, ако ударната (импулсната) отпорност на заземјување е  $R_i < 15 \Omega$ . Ако оваа вредност не може да се постигне на економичен начин, кај одделни столбови ќе треба да се засили нивната изолација или на тој дел од водот да се толерира зголемен број дефекти.

Условите за безбедност од превисоки напони треба да се задоволат во следните случаи:

- кај столбови кои се наоѓаат на терени како што се: јавни базени, кампови, детски игралишта и др. без разлика на напонското ниво на водот и начинот на заземјување на неутралната точка;
- кај столбови кои се наоѓаат на обработливи површини, покрај прометни патишта и во населени места, кога неутралната точка на мрежата е изолирана;
- кај столбови на кои се наоѓаат линиски разделувачи.

Според овие препораки условите за безбедност се задоволени ако кај столбот не може да се појави траен напон на допир поголем од 65 V.

### ***Избор на конфигурацијата и типот на заземјувачите според Препораката ТП-9***

Препорака ТП-9 во основа дава насоки кои му помагаат на проектантот при изборот на типот и димензиите на заземјувачот. Изборот на конфигурацијата и димензиите на заземјувачите од надземните водови, според одредбите на оваа препорака, треба да се врши:

- врз основа на избраната вредност на струјата на громот во столбот или во заштитното јаже и
- врз основа на познатата вредност на струјата на еднофазна куса врска/земен спој.

Според ТП-9, заземјувачите на столбовите од надземните водови се изведуваат обично со еден или повеќе прстени, (во форма на круг, квадрат или правоаголник), во форма на ѕвезда со повеќе зраци или пак се изведуваат како некоја нивна комбинација. Заземјувачите на столбовите кај 10 kV, 20 kV, и 35 kV надземни водови обично се изведуваат како *прстенести*, со еден прстен на растојание  $1,0 \div 1,3$  m од работ на столбот, или пак со два прстена. Првиот прстен служи за обликување на потенцијалот околу столбот и за намалување на потенцијалната разлика на допир  $E_d$ . Кога е сам, се поставува на длабочина од  $0,7 \div 0,8$  m, додека кога постојат два (или повеќе) прстена, се поставува на длабочина од 0,5 m. Вториот прстен, пак, ако го има, се поставува на длабочина од 1 m и служи за намалување на отпорноста на распростирање  $R_z$  и на напонот на чекор.

Изборот на контурните и прстенести заземјувачи е сврзан со условите за заштита од превисоки напони на допир и чекор. Со погоден избор на соодветната конфигурација (еден или два прстена, употреба на дополнителни хоризонтални краци и сл.) и со погоден избор на димензиите и длабочината на закопување на заземјувачот, проектантот се труди да ја постигне бараната вредност на отпорноста на распростирање  $R_z$ , но и да обезбеди најповолна распределба на потенцијалите во околината на посматраното столбно место. При ваквиот избор проектантот се служи со разни табели во кои се дадени отпорностите на распростирање и други карактеристики на голем број типски заземјувачи на столбовите (на пример сликите 6.17 ÷ 6.19).

*Прстенестите заземјувачи* се состојат од прстен којшто обично се поставува на длабочина од  $0,7 \div 0,8$  m. Исклучок се местата со заострени барања во поглед на исполнување на условите за безбедност и таму се користат заземјувачи со два прстена. Во тој случај првиот прстен се поставува на длабочина од 0,5 m и на оддалеченост  $1 \div 1,5$  m од столбот, додека вториот прстен се поставува на длабочина од 1 m и на растојание најмалку 2 m од столбот. Прстенестите заземјувачи имаат предност во услови на ограничен простор, како и во случаите каде што треба да се подобри заштитата од превисок напон на допир.

Кога единствен критериум за избор и димензионирање на заземјувачите е заштитата на водот од атмосферски пренапони, во тој случај Препораката ТП-9 препорачува примена на зракастите заземјувачи. Тие се применуваат тогаш кога поради високата специфична отпорност на тлото или поради релативна непристапност до столбното место, не се бара никаква заштита од влијанието на напонот на чекор/допир на лице место.

Бројот на краците (лентите) на зракастиот заземјувач се одбира во согласност со реалните услови и можноста на нивно полагање на терен, но и врз основа на вредноста на специфичната отпорност  $\rho$  на посматраното столбно место. Нивната должина се одбира водејќи сметка за условите за безбедност, односно условот за заштита од повратен прескок.

Во поглед на дилемата дали на теренот со висока специфична отпорност да се предвиди заземјувач со два, три или пак со четири краци, треба да се има предвид следното. Заземјувачите со два крака (до определена должина на краците) се најекономично решение. Заземјувачот со три краци претставува порационално и поекономично решение од оној со 4 краци, но со иста вкупна должина. Употребата на четвртиот крак во таа смисла има оправдување само тогаш кога се сака да се постигне поповолна распределба на потенцијалите во околината на столбното место.

### **6.1.3. Изведување на заземјувањето на столбовите од надземните водови**

#### ***Изведба на заземјувањето на столбовите на 10 kV и 20 kV водови***

Заземјувачите на столбовите за 10 односно 20 kV, според Препораката ТП-9, треба да се изведуваат со еден прстен (сл. 6.8) или како ѕвезда со четири краци (сл. 6.4). По исклучок, тие се изведуваат со два прстена (сл. 6.9) или како ѕвезда со три или два крака (сл. 6.5 ÷ сл. 6.7).

Според Препораката ТП-9 критериумот за заштита од повратен прескок е задоволен ако импулсната отпорност на заземјувањето е  $R_i \leq 15 \Omega$ . Доколку тоа не може да се постигне на економичен начин, на овој дел од водот треба да се очекуваат зголемен број на дефекти.

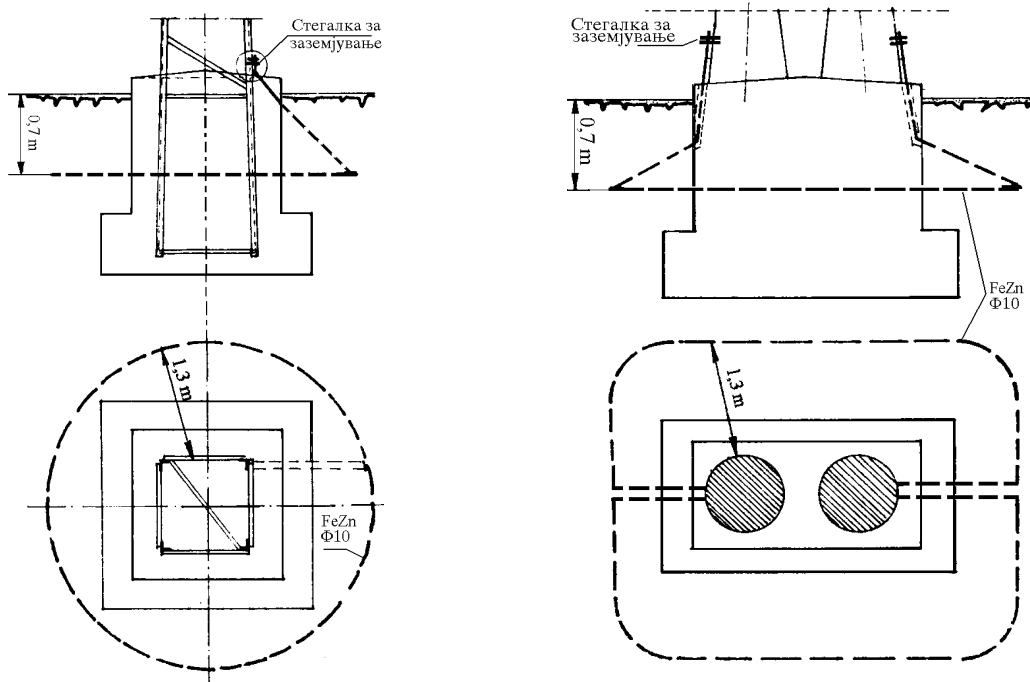
Ако во текот на работата на водот се утврди дека одделни столбови се особено подложни на дефекти поради атмосферски празнења, на таквите столбови ќе треба да се подобрат заземјувачите или пак на тие столбни места да се засили електричната изолација.

Кај мрежите со незаземјена (изолирана) неутрална точка задолжително е задоволување на условите за безбедност од превисоките напони на допир и чекор кај столбовите што се лоцирани во населените места, покрај прометните патишта и на обработливите површини.

Кај мрежите со заземјена неутрална точка преку мала отпорност не е потребно димензионирање на заземјувачите според критериумот за заштита од превисоки напони на допир. Исклучок се столбовите кои се наоѓаат на терени каде што треба да се запазат условите за безбедност. Кај нив заземјувачите се изведуваат со два прстена.

Заземјувачот кај овие столбови се изведува со еден прстен на растојание 1,3 m од столбот. На сликата 6.2 е прикажан пример за изведба на заземјувач на еден носечки челично-решаткаст столб (сл. 6.2 а) и на еден специјален бетонски столб, чиј темел има форма на правоаголник (сл. 6.2 б). По исклучок, кога се бара зголемена безбедност (за столбовите што се наоѓаат на терени какви што се плажите, детските игралиштата, спортските терени, камповите и слично) се препорачува изведба со два прстена. Понекогаш, кога далекуводот е изложен на интензивни атмосферски празнења, поповолно е тој да биде изведен во форма на ѕвезда со четири или три краци, според сл. 6.4 односно сл. 6.5.

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



Слика 6.2. Изведба на заземјувачите кај 35 kV надземни водови:  
а) челично-решеткаст и б) бетонски, специјален

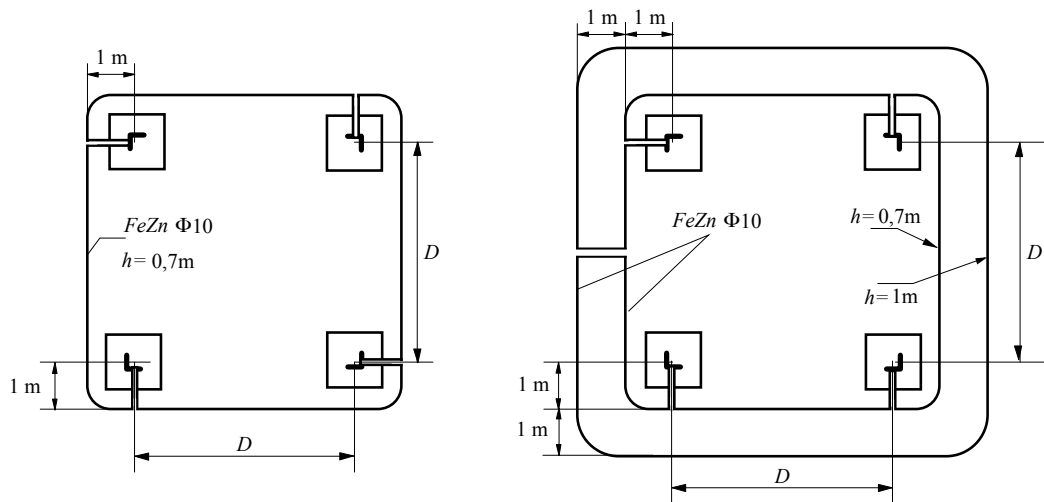
Кога неутралната точка во 35 kV мрежи е заземјена преку мала отпорност, тогаш не е потребно димензионирање на заземјувачот спрема критериумот за заштита од превисоки напони на допир. Исклучок се столбовите што се наоѓаат на претходно споменатите терени, каде што треба да се запазат условите за безопасност. Кај нив заземјувачот се изведува со два прстена, и тоа е доволна мерка за задоволување на условите за безопасност.

Кај столбовите на кои се поставени одводници на пренапони како заземјувач на се користи 4 крака звезда со должина на краците од по 2,5 m. Доколку за таквото столбно место е предвидено обликување на потенцијалот, тогаш заземјувањето се врши со заземјувач со еден или со два прстена.

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

### Изведба на заземјувањето на столбовите на 110 kV водови

За заземјување на 110 kV столбови ТП-9 препорачува прстенести заземјувачи. Темелот на овие столбови е расчленет, составен од четири стопи (сл. 6.11 а, б), симетрично поставени во однос на оската на столбот. Растојанието помеѓу стопите зависи од висината на столбовите и се движи од 2.5 m за најмалите до 6 m за највисоките столбови. Околу темелот се поставува контурен заземјувач со квадратна форма, на длабочина  $h \sim 0,7$  m и на растојание 1 m од работ на темелот, т.е. габаритот на столбот (сл. 6.3 а). Заземјувачот се поврзува барем на две места со конструкцијата на столбот. Кај столбовите со 4 стопи се препорачува секој крак (стопа) на столбот да има свој приклучок на заземјувачот.



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

Слика 6.3. Изведба на прстенестите заземјувачите кај 110 kV водови

По исклучок, кога столбот се наоѓа покрај детско игралиште, камп, плажа, прометен пат и сл, каде што е неопходно да се запазат условите за безбедност (обликување на потенцијалот), заземјувачот од столбот задолжително се изведува со две контури (сл. 6.3 б). Притоа, втората контура се поставува на растојание 1 m од првата и на длабочина од  $h \approx 1$  m.

Неутралната точка од 110 kV мрежи кај нас е директно заземјена, па секој земјоспој претставува всушност еднофазна куса врска, која за многу кусо време ( $0,1 \div 0,2$  s) се исклучува од страна на релејната заштита. Затоа, овде прописите не бараат посебни пресметки и проверки на големината на напоните на допир, ниту пак вршат друг вид ограничувања.

Ако некои столбови се посебно подложни на дефекти поради атмосферските празнења, заземјувачите на таквите столбови ќе треба да се подобрат, или пак ќе биде потребно изолацијата на столбовите да се засили, или да се применат обете мерки.

### **Примена на заштитни јажиња**

Заштитното јаже служи за заштита на водот од директен удар на гром. Се поставува доволно високо над фазните спроводници така да обезбеди заштитен агол од најмногу  $30^\circ$ . Според Препораката ТП-9, надземните водови со номинален напон  $U_n \geq 35$  kV се изведуваат со заштитно јаже. 110 kV водови се градат по целата должина со заштитно јаже, додека должината на заштитното јаже на 35 kV водови треба да изнесува најмалку 1 km пред постројката која ја напојува тој вод.

10 kV и 20 kV водови се градат без заштитно јаже. Исклучок се водовите кои што минуваат низ терени со зачестени атмосферски празнења и водовите кои напојуваат важни објекти (магацини, војни објекти, радио и ТВ предаватели и сл.)

Заштитно јаже не се поставува на нисконапонските водови.

### **Мерење на отпорноста на распростирање на заземјувачите на столбовите**

Со Препораката ТП-9 се предвидува, пред активирање на високонапонскиот вод, да се изврши мерење на отпорноста на распростирање на заземјувачот кај секој столб за кој е изведен посебен заземјувач. Мерењето се врши со преносен мерен уред со сопствен извор на наизменична струја со фреквенција до 150 Hz и се изведува без одвојување на заземјувачот

од конструкцијата на столбот, заедно со заштитното јаже. Се смета дека заштита од повратен прескок е постигната ако со мерењето се добие:

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

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

За столбови со заштитно јаже се препорачува и мерење на ударната отпорност на распростирање на заземјувачот со високофреквентен уред. Мерењето се врши со споени заземјувач и заштитно јаже, но се добиваат вредности како да е заштитното јаже одвоено од столбот. Се смета дека заштитата од повратен прескок е постигната ако со мерењето се добие:

$$R_i \leq 10 \Omega.$$

Специфичната отпорност на распростирање на тлото посебно не се мери.

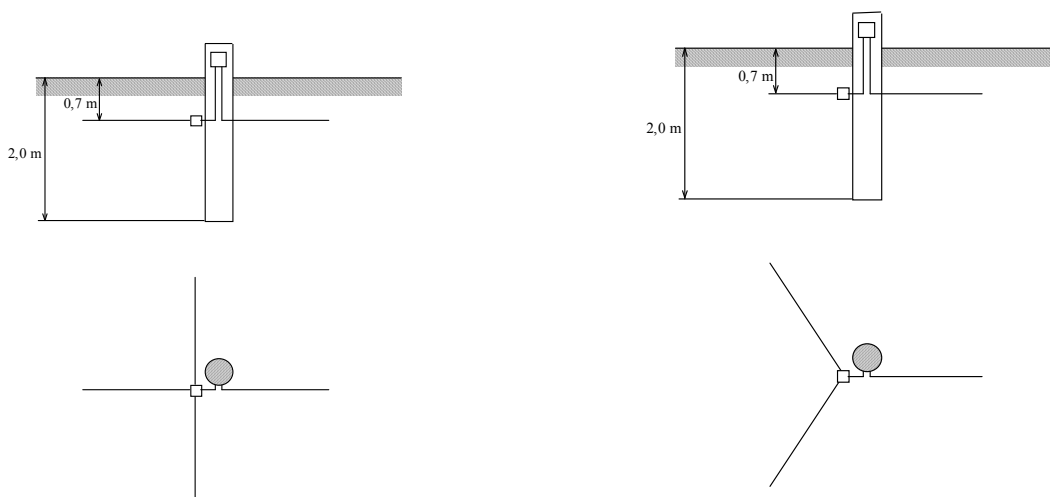
## 6.2. ТИПСКИ ЗАЗЕМЈУВАЧИ НА СТОЛБОВИТЕ ОД НАДЗЕМНИТЕ ВОДОВИ

Правилникот па дури и техничката препорака ТП-9 сепак му оставаат на проектантот можност за широк избор на типот и димензиите на заземјувачот. Изборот треба да се темели на традицијата, искуството и интуицијата на проектантот. За таа цел вообичаено е воведување и работа со фамилија на т.н. "типски" заземјувачи.

### Зракасти заземјувачи

Општо гледано постојат пет фамилии "типски зракасти" заземјувачи. Се изработуваат од FeZn жица со дијаметар 10 mm ( $\Phi 10$ ), а се разликуваат по бројот на зраци или во нивниот распоред. Должината на зраците е од 1 до 20 m, зависно од спец. отпорност  $\rho$  на тлото во кое се поставува заземјувачот и отпорноста на распростирање што се сака да се постигне. Зраците се закопуваат на длабочина од 0,7 m. При анализите на сите фамилии зракасти заземјувачи вршени за потребите на овој учебник, усвоено е дека тие се користат за заземјување на армиранобетонски столбови со дијаметар во основата 250 mm, при што е земено предвид и влијанието на арматурата на столбовите. Притоа челичната арматура на столбот се моделира со вертикален цилиндер со должина  $l_s = 2$  m и преченик  $d_s = 200$  mm.

Секој типски зракаст заземјувач има своја ознака и карактеристики. Ознаките на сите фамилии зракасти заземјувачи, воведени во учебников, започнуваат со буквата L (а оние со специфичен облик ја имаат и буквата со која се искажува обликот). Остатокот од ознаката се цифри со кои се означува бројот на зраците и нивната должина. На пр. L2×10 е ознака за заземјувач со два зрака, секој со должина од по 10 m.



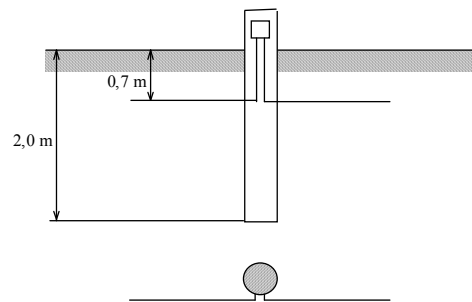
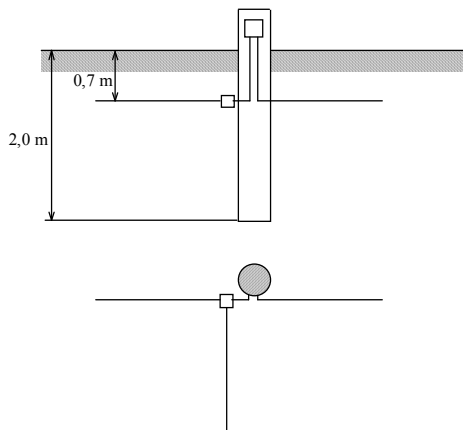
**Слика 6.4. Скица на заземјувач од фамилија L4**

Заземјувачите од фамилијата L4 се состојат од 4 зраци со иста должина, (сл. 6.4). Кај нив потенцијалната разлика на чекор  $E_c$  и допир  $E_d$  се најголеми во правец на симетралите на квадрантите.

Заземјувачите од фамилијата L3 се составени од три зраци со иста должина поставени под агол од  $120^\circ$  како на сликата 6.5. Најголемите потенцијални разлики на чекор  $E_c$  и на допир  $E_d$ , слично како и во претходниот случај, се јавуваат во симетралите на аглиите.

Заземјувачите од фамилијата LT3 се составени од три зраци со иста должина поставени во форма на буквата "Т", (слика 6.6). Најголемите потенцијални разлики на чекор  $E_c$  и на допир  $E_d$  се јавуваат во правец спротивен од правецот на средниот крак.

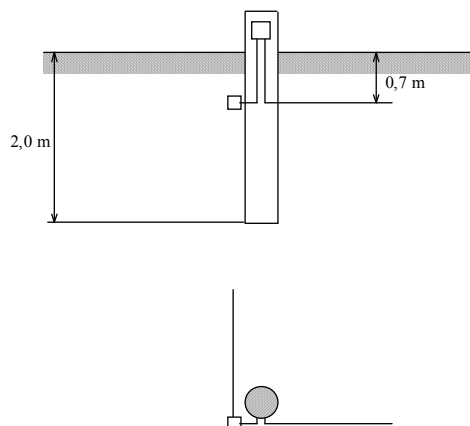
Заземјувачите од фамилијата L2 се составени од два зрака со иста должина поставени под агол од  $180^\circ$  (слика 6.7). Најголемите потенцијални разлики на чекор  $E_c$  и на допир  $E_d$  се јавуваат во правец нормален на краците.



**Сл. 6.7. Скица на заземјувач од фамилија L2**

**Сл.6.6. Скица на заземјувач од фамилија LT3**

Заземјувачите од фамилијата LT2 се составени од два зрака со иста должина поставени под прав агол, (слика 6.8). Најголемите потенцијални разлики на чекор  $E_c$  и на допир  $E_d$  се јавуваат во правец на симетралата на надворешниот (тап) агол.

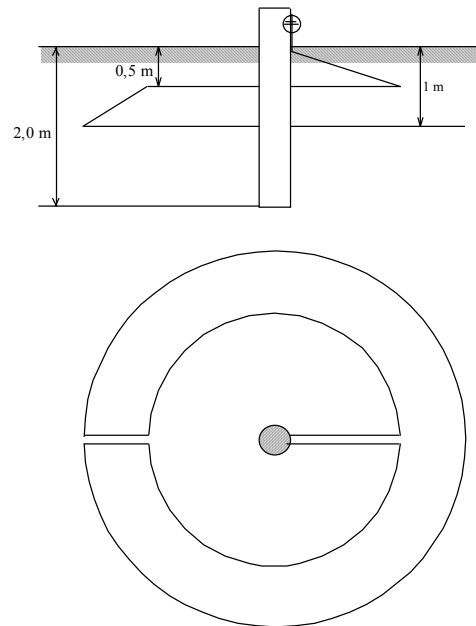
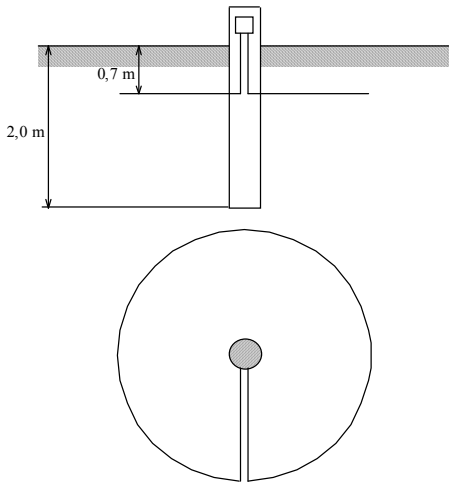


**Слика 6.8. Скица на заземјувач од фамилијата LT2**

### Прстенести заземјувачи

Овие заземјувачи се применуваат како заземјувачи на 10, 20 и 35 kV армиранобетонски столбови. Се изведуваат во две фамилии означени во учебников со ознаките P1 и P2. Заземјувачите од фамилијата P1 се со еден прстен, во форма кружница, поставен на длабочина од  $0,7 \pm 0,8$  m и со радиус  $R$  од 1 до 6 m, (слика 6.9). Заземјувачите од втората фамилија P2 се со два прстена од кои првиот е на длабочина од 0,5 m и со радиус  $R_1$  од околу 1 m, а вториот прстен е на длабочина од 1 m и со радиус  $R_2$  за најмалку 1 m поголем од радиусот на првиот (слика 6.10). Прстените се изработени од поцинкувана челична жица со дијаметар 10 mm. Во означувањето е усвоено втората и третата цифра во ознаката да го означува радиусот на првиот прстен во m. Така, на пример, ознаката P1 2.0 означува заземјувач со еден прстен со радиус 2,0 m.

Кај овие заземјувачи поради симетрија потенцијалните разлики на чекор  $E_c$  и на допир  $E_d$  се исти во сите правци.

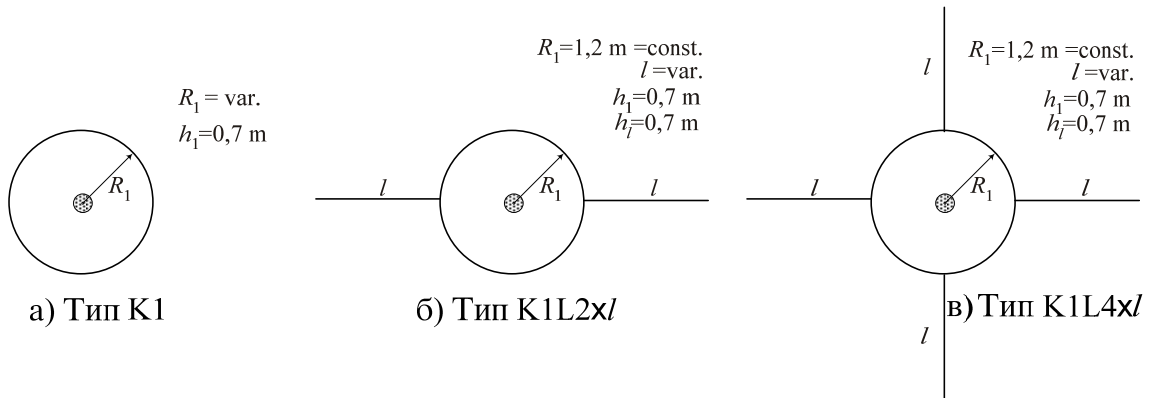


Сл. 6.9. Скица на заземјувач од фамилијата P1

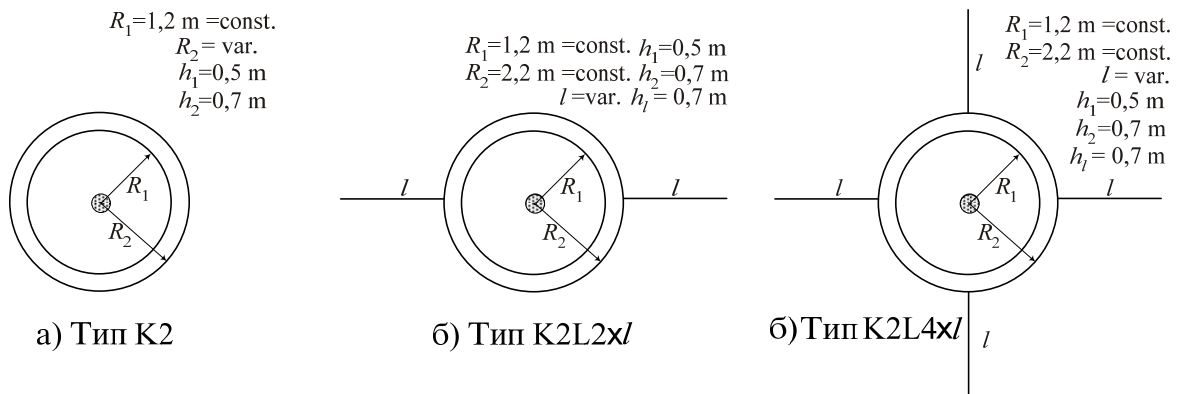
Сл. 6.10. Скица на заземјувач од фамилијата P2

### Комбинирани прстенести-зракасти заземјувачи

Во овој дел е прикажана фамилија типски заземјувачи за столбовите од среднонапонските надземни водови. Тие претставуваат комбинација од прстенестите и зракастите заземјувачи и ги поседуваат предностите и од обете фамилии заземјувачи. Имено, со прстенестиот дел од заземјувачот се постигнува поволно обликување на потенцијалите во близината на самиот столб, додека со зраците (краците) во основа се врши намалување отпорноста на распространување на заземјувачот. Изгледот на овие типски форми заземјувачи е прикажан на сликите 6.11 – 6.13.



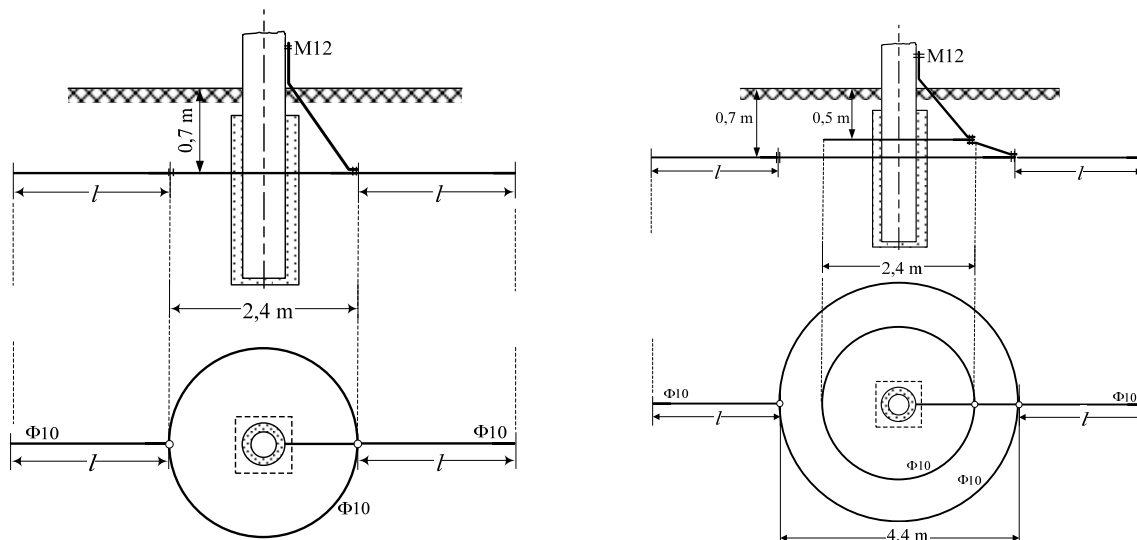
Слика 6.11. Скици на едноконтурни заземјувачи од типот К1, К1L2x/l и К1L4x/l



Слика 6.12. Скици на двоконтурни заземјувачи од типот К2, К2L2x/l и К2L4x/l

За секој од типските заземјувачи се пресметани основните параметри: отпорноста на распространување  $R_z$  и максималните потенцијални разлики на допир и чекор  $E_{d,\text{max}}$  и  $E_{c,\text{max}}$ . Резултатите од пресметките се прикажани во точката 6.5.8, во форма на табели.

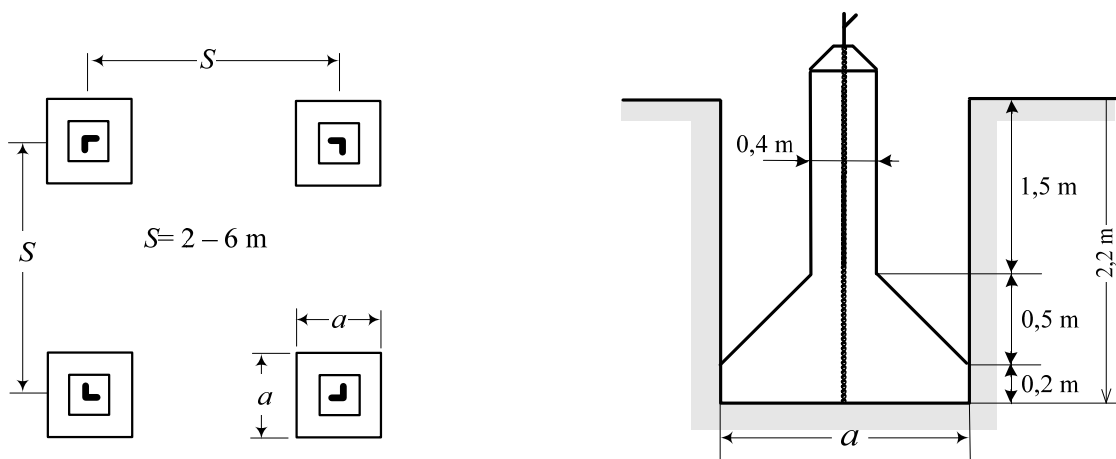




Слика 6.13. Скици на заземјувачи од типот K1L2 и K2L2

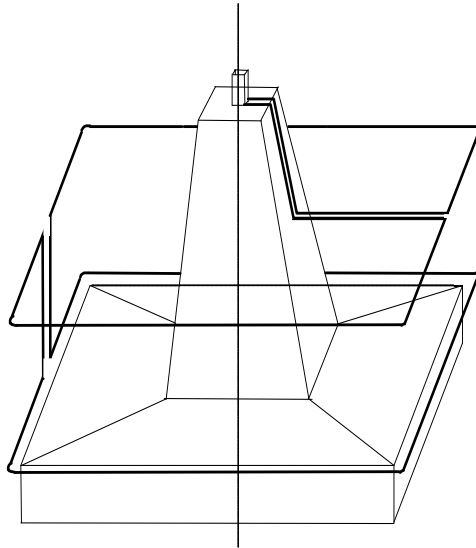
### Типски заземјувачи на столбовите за висок и највисок напон ( $U_n \geq 110 \text{ kV}$ )

За заземјување на челично решеткастите столбови на ВН надземни водови ( $U_n \geq 110 \text{ kV}$ ) се употребуваат контурни заземјувачи. Темелот на овие столбови е расчленет, составен од 4 симетрично поставени стопа, (сл. 6.14.а). На сл. 6.14.б е прикажан надолжниот пресек на една стопа со просечни димензии за еден 110 kV столб. Растојанието помеѓу стопите  $S$ , кое се движи од 2,5 m до 6 m, зависи од висината на столбовите. Вистинските димензии на стопата, пак, зависат од носивоста на тлото. Ширината на стопите кај 110 kV водови обично се движи во интервалот  $1,3 \leq a \leq 1,8 \text{ m}$  додека кај 400 kV водови тие се скоро двојно поголеми. Вообичаените вредности на останатите димензии на стопата кај 110 kV водови се прикажани на сликата 6.14.б.



Слика 6.14: а) Распоред на стопите на темелот;  
б) Надолжен пресек на една стопа

Заедничко за сите заземјувачи на овие столбови е тоа што околу секоја од четирите стопа на темелот се поставуваат по два прстена во форма на квадрат, сл. 6.15. Првиот е предвиден да се постави на длабочина од 0,5 m, додека вториот се поставува на длабочина во согласност со длабочината на стопата (најчесто на длабочина  $2 \div 2,5 \text{ m}$ ). На тој начин се добива заземјувачот од типот "А" (слика 6.16).

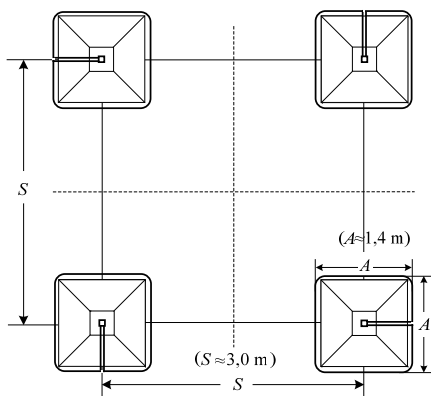


**Слика 6.15. Изглед на заземјувачот околу стопата**

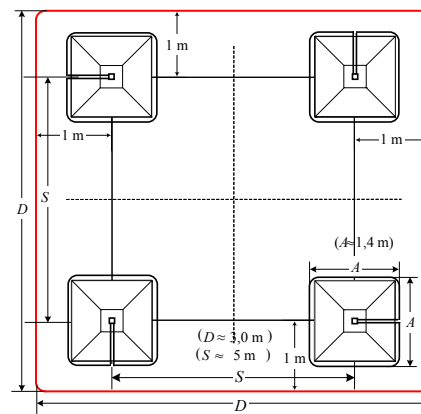
Покрај прстените, поставени околу секоја стопа, кај некои заземјувачи, означени како тип „В“, е предвидено поставување на уште еден дополнителен прстен на длабочина од  $0.7 \div 0.8$  m, со кој што се опфатени сите 4 стопи од темелот. Овој прстен исто така има форма на квадрат или правоаголник со променлива страница, а неговата димензија зависи од меѓусебното растојание на стопите, т.е. повторно зависи од височината на столбот и носивоста на тлото. Се поставува така што се наоѓа на хоризонтална оддалеченост 1 m од страниците на ногарите од стопите на темелот (сл. 6.17).

Заземјувачите од типот „А“ (без заеднички правоаголен прстен околу стопите на столбот) се најчесто во примена, како наједноставни и најевтини. Заземјувачите од типот „В“, со заеднички правоаголен прстен во форма на правоаголник се наменети за оние столбни места кај кои луѓето (или животните) имаат лесен пристап (населено место, близина на прометен пат, нива, парк, кампинг и сл). Кај нив со вметнувањето на заедничкиот прстен околу сите 4 стопи се намалува отпорноста на распростирање на заземјувачот и се врши обликување на потенцијалот во околината на столбот, со цел да се намали ризикот поради можноста за појава на преголеми напони на чекор/допир при појава на куси врски на водот.

Освен прстените, поставени околу секоја стопа, понекогаш, кај некои од типските заземјувачи кај кои се бара намалување на отпорноста на распростирање  $R_z$ , се предвидува и дополнително поставување на  $2 \div 4$  хоризонтални зраци (краци или испусти). Хоризонталните зраци се особено ефикасни на терените со зачестени атмосферски празнења бидејќи придонесуваат за значителното намалување на бројот на испадите на надземните водови под дејство на атмосферските празнења, со цел да се избегне влијанието на сезонската варијација на количеството влага во тлото врз карактеристиките на заземјувачот пожелно е зраците да се закопуваат на длабочина од  $0.7 \div 0.8$  m. Тие можат да имаат променлива должина  $l$  ( $l = 5 \div 40$  m). Овие зраци обично се произведуваат од поцинкувано валчесто железо  $\Phi 10$  или  $\Phi 12$ , или пак од поцинкувана челична лента FeZn  $30 \times 4$ .

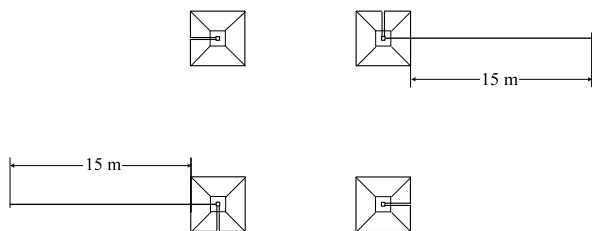


Слика 6.16. Изглед на заземјувачот од типот "А" (поглед од горе)

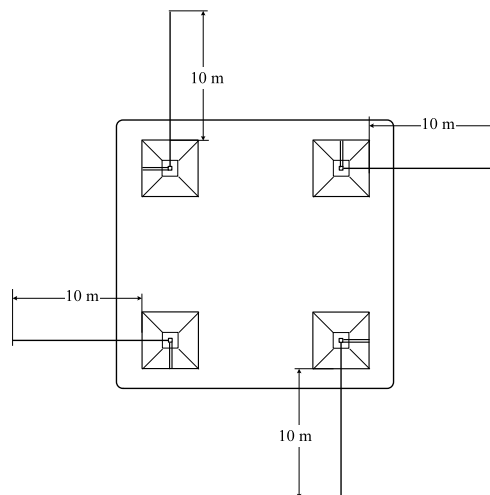


Слика 6.17. Изглед на заземјувачот од типот "В" (поглед од горе)

На сликата 6.18 е прикажана скицата на типски заземјувач од фамилијата А2L; ( $l=15$  m), додека на сликата 6.19 е прикажана скицата на типски заземјувач од фамилијата В4L; ( $l=10$  m).



Слика 6.18. Скица на заземјувачот тип "А2×15"



Слика 6.19. Скица на заземјувачот тип "В4×10"

Има случаи, особено кај 400 kV надземни водови, кога заземјувачите да се изведуваат и со две правоаголни контури. При тоа првата контура се поставува на длабочина од 0,7 m и на растојание 1 m од работ на стопите, а втората на длабочина 1 m и на растојание 1 m од првата. Во сите горенаведени случаи контурите се изработени од поцинкувана челична жица со дијаметар 10 mm.

### 6.3. ОСНОВНИ КАРАКТЕРИСТИКИ НА ТИПСКИТЕ ЗАЗЕМЈУВАЧИ

Во постапката за решавање на заземјувачкиот систем на еден вод се тргнува од идејата за постоење на фамилија типски заземјувачи. Изборот на типските заземјувачи, притоа, треба да базира на претходни теориски анализи и да е осмислен така што тие од една страна да ги задоволат условите предвидени со техничките прописи, а од друга страна, максимално ќе се води сметка за економичноста.

При изборот на конфигурацијата и димензиите на типските заземјувачи е потребно да биде консултирана соодветна стручна литература. Испитувањата на основните карактеристики на типските заземјувачи (отпорноста на распространување  $R_z$ , потенцијалната разлика

на чекор  $E_c$ , потенцијалната разлика на допир  $E_d$ , цената на чинење и др.) обично се вршат на модел со хомогено тло, и покрај тоа што во стварност овие заземјувачи обично работат во услови на хетерогено тло.

Пресметките на карактеристиките на типските форми заземјувачи во денешно време се вршат со помош на готови компјутерски програми.

При моделирањето на заземјувачите за потребите на пресметување на нивните карактеристики, кај металните и армирано-бетонските столбови е потребно да се земе предвид и влијанието на темелите од столбовите бидејќи тоа воопшто не е занемарливо. Темелите обично се земаат предвид на тој начин што се моделираат со некакви упростени правилни форми. На пример цилиндричниот темел кај армирано-бетонските столбови сосема коректно може да се замени со соодветен вертикален цевкаст заземјувач, додека едноблоковиот темел на челично-решеткастите столбови може приближно но сепак успешно да се еквивалентира со модел на полутопка чија што површина ќе биде еднаква на површината на бочните страни од темелот, итн.

Во наредниот дел од текстот се прикажани резултатите од некои од пресметките. Притоа со  $R'_z$  е означена отпорноста на распространување на одделните заземјувачи во услови кога се тие поставени во хомогено тло со специфична отпорност  $\rho = 100 \Omega\text{m}$ .

### 6.3.1. Типски заземјувачи за СН столбови 10, 20 и 35 kV

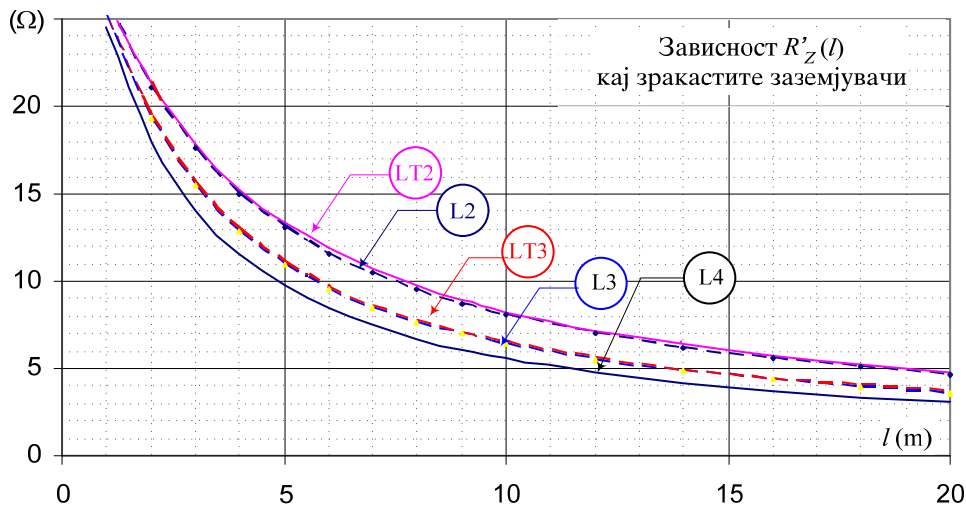
#### *Зракасти заземјувачи*

Параметрите на зракастите заземјувачи  $R_z$ ,  $E_{d,\text{max}}\%$  и  $E_{c,\text{max}}\%$  во основа зависат од должината на секој од краците  $l$ , а многу помалку зависат од длабочината на закопување  $h$  и пречникот на електродите  $d$ . Врз споменатите параметри на заземјувачите, особено врз големините  $E_{d,\text{max}}\%$  и  $E_{c,\text{max}}\%$  влијае и самиот столб, односно неговиот темел и неговото присуство не смее да се занемарува. Во натамошниот дел ќе бидат прикажани параметрите на типските форми заземјувачи L2, LT2, L3, LT3 и L4, опишани во претходниот дел од оваа глава. Тие се однесуваат на случајот кога е  $\rho = 100 \Omega\text{m}$ ,  $d = 9 \text{ mm}$  и  $h = 0,8 \text{ m}$ . Темелот од столбот е притоа моделиран со цилиндер со пречник  $d_s = 0,2 \text{ m}$  и должина  $l_s = 2 \text{ m}$ .

**Табела 6.3. Зависност  $R'_z(l)$  кај типските зракасти заземјувачи**

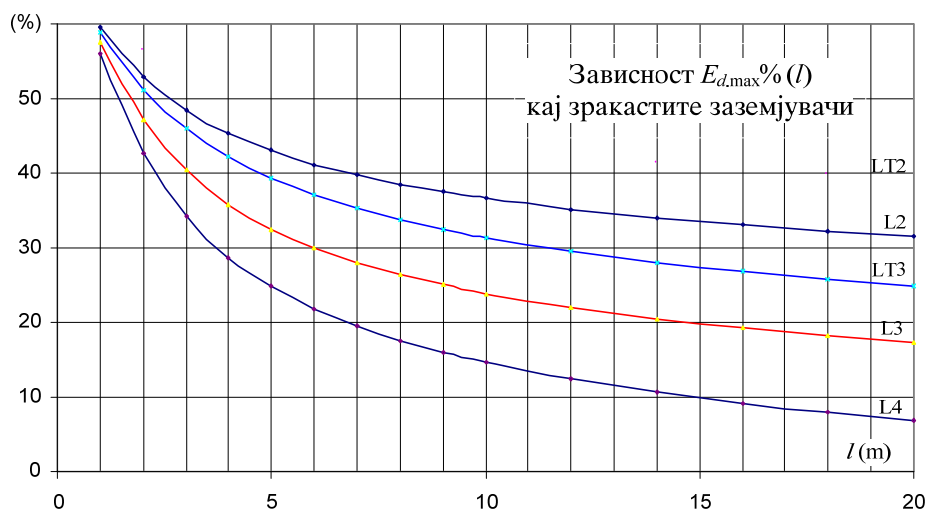
$l$ (m)	тип L2	тип LT2	тип L3	тип LT3	тип L4
1	25.997	26.077	25.191	25.242	24.573
2	21.113	21.311	19.275	19.384	18.031
3	17.589	17.838	15.433	15.557	14.078
4	15.005	15.268	12.811	12.936	11.502
5	13.078	13.338	10.950	11.068	9.724
6	11.596	11.845	9.569	9.679	8.430
7	10.426	10.663	8.507	8.609	7.449
8	9.480	9.703	7.665	7.760	6.680
9	8.699	8.909	6.979	7.070	6.061
10	8.043	8.242	6.416	6.497	5.551
12	7.002	7.180	5.531	5.603	4.761
14	6.212	6.373	4.871	4.935	4.176
16	5.592	5.738	4.359	4.416	3.725
18	5.091	5.224	3.948	4.001	3.366
20	4.677	4.800	3.613	3.661	3.074

Во табелата 6.3 е прикажана зависноста на константата на отпорноста на распростирање  $R'_z(l)$  за споменатите типови заземјувачи. На сликата 6.20а е прикажана во графичка форма истата таа зависност во услови на хомогено тло со  $\rho = 100 \Omega\text{m}$ .



**Слика 6.20а. Зависност на  $R'_z(\Omega)$  кај зракасти заземјувачи од должината на краците  $l(m)$**

На сликата 6.20б е прикажана во зависноста на најголемата разлика на допир  $E_{d,max}\%$  од должината на краците  $l$  кај разгледуваните типски заземјувачи. Најголемите потенцијални разлики на чекор  $E_{c,max}\%$  не се прикажани бидејќи тие се помали од соодветните вредности на разликите на допир  $E_{d,max}\%$ .



**Слика 6.20б. Зависност на  $E_{d,max}\%$  ( $l$ ) кај зракасти заземјувачи од должината на краците  $l(m)$**

### **Прстенести заземјувачи**

Во табелата 6.4 се прикажани основните карактеристики на прстенестите заземјувачи од типот P1 (заземјувачи со еден кружен прстен, според сл. 6.9) и типот P2 (два кружни прстена, според сл. 6.10) во зависност од пречникот  $D$  на првиот, односно вториот прстен, во услови на хомогено тло со отпорност  $\rho=100 \Omega\text{m}$ . И во овој случај темелот на столбот се моделира со цилиндер со пречник  $d_s = 0,2 \text{ m}$  и должина  $l_s = 2 \text{ m}$ . Притоа кај прстенестите

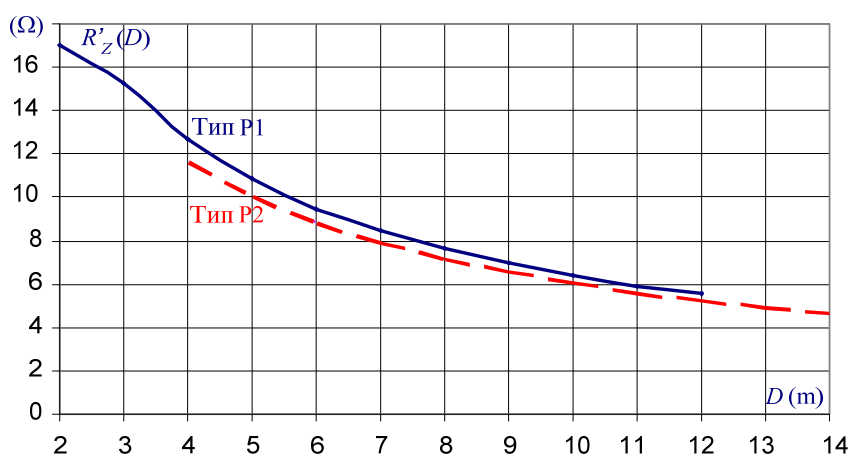
заземјувачи тип P1 кружниот прстен е со следните карактеристики:  $d_1=9$  mm;  $h_1 = 0,8$  m и пречник  $D = D_1$  кој што се менува во границите од 2 до 12 m. Кај заземјувачите од типот P2 првиот кружен прстен е со фиксен пречник  $D_1 = 2$  m;  $d_1 = 9$  mm и  $h_1 = 0,5$  m, додека вториот кружен прстен е со променлив пречник  $D = D_2 = 4 \div 14$  m; и останати карактеристики:  $d_2 = 9$  mm и  $h_2 = 0,8$  m.

**Табела 6.4. Основни карактеристики на прстенестите заземјувачи тип P1 и P2**

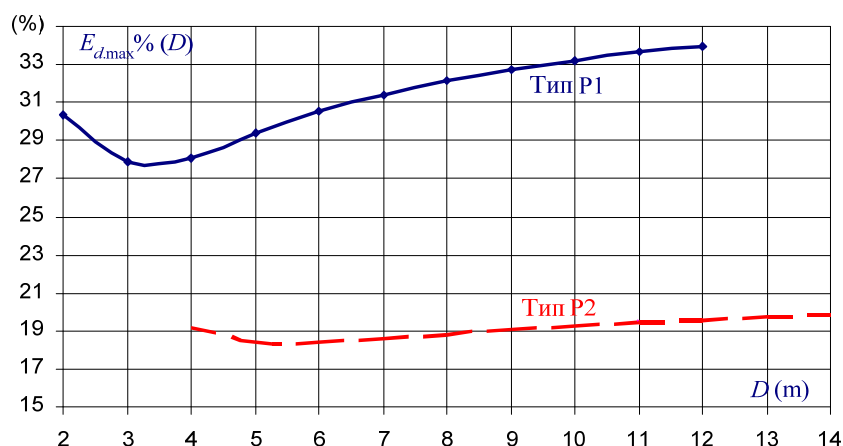
$D$ (m)	заземјувач тип P1			заземјувач тип P2		
	$R_Z$ ( $\Omega$ )	$E_{d,max}\%$ (%)	$E_{c,max}\%$ (%)	$R_Z$ ( $\Omega$ )	$E_{d,max}\%$ (%)	$E_{c,max}\%$ (%)
2	16.985	30.3	26.7			
3	15.274	27.8	24.3			
4	12.687	28.1	22.4	11.644	19.1	19.3
5	10.852	29.4	22.6	10.040	18.4	18.4
6	9.494	30.5	22.8	8.831	18.4	18.4
7	8.449	31.4	23.1	7.890	18.6	18.3
8	7.622	32.2	23.3	7.140	18.8	18.3
9	6.950	32.7	23.5	6.528	19.0	18.3
10	6.393	33.2	23.7	6.018	19.2	18.3
11	5.924	33.6	23.8	5.587	19.4	18.4
12	5.522	34.0	24.0	5.217	19.6	18.4
13				4.897	19.7	18.5
14				4.616	19.9	18.5

На сликата 6.21а е прикажана зависноста на отпорноста на распространување  $R'_Z$  кај прстенестите заземјувачи од пречникот  $D$  на прстенот ( $D = D_1$ ) кај заземјувачите тип P1, односно од пречникот на вториот прстен ( $D = D_2$ ) кај заземјувачите тип P2.

На сликата 6.21б е прикажана во зависноста на најголемата разлика на допир  $E_{d,max}\%$  од пречникот  $D$  ( $D = D_1$ ) на првиот (кај заземјувачите тип P1) односно вториот прстен (кај заземјувачите тип P2). Најголемите потенцијални разлики на чекор  $E_{c,max}\%$  и во овој случај не се прикажани бидејќи тие се помали од соодветните вредности на разликите на допир  $E_{d,max}\%$ .



**Слика 6.21а. Зависност  $R'_Z(D)$  кај прстенести заземјувачи со еден (P1) и два (P2) прстена**



Слика 6.216. Зависност  $E_{d,max} \% (D)$  кај прстенести заземјувачи со еден (P1) и два (P2) прстена

### Комбинирани прстенести-зракасти заземјувачи

Од дијаграмите прикажани на сликите 6.21a и 6.21б е очигледно дека првиот (внатрешен) прстен кај двоконтурните прстенести заземјувачи од типот P2 многу малку влијае врз големината на отпорноста на распростирање на заземјувачот  $R_z$  и служи, во основа, за поволно обликување на потенцијалот во околината на столбот, додека со вториот (надворешен) прстен се постигнува потребното намалување на отпорноста  $R_z$ .

Истата идеја може да се спроведе и на друг начин. Имено ако улогата надворешниот прстен го замениме со два или четири хоризонтални краци, како кај комбинираните заземјувачи од типот K1L2 односно K1L4 (слика 6.11) ќе ги постигнеме истите ефекти. Тоа била идејата од воведувањето на овој тип заземјувачи, опишан во точката 6.5.7.

Во табелите 6.5 и 6.6 се прикажани некои од основните карактеристики на овие заземјувачи. Тие се однесуваат на следните услови: тло – хомогено,  $\rho = 100 \Omega\text{m}$ ; спроводници (електроди): валчесто поцинкувано железо  $\Phi 10''$  ( $d = 10 \text{ mm}$ ); длабочина на закопување: прв прстен  $h_1 = 0,5 \text{ m}$ ; втор прстен и хоризонтални краци:  $h_2 = 0,7 \text{ m}$ ; темелот на столбот е симулира со цилиндер со димензии  $d_s = 0,2 \text{ m}$  и  $l_s = 2 \text{ m}$ .

Табела 6.5. Карактеристики на едноконтурните комбинирани заземјувачи од фамилијата K1

Заз. тип K1	R ( $\Omega$ )	$E_d$ (%)	$E_c$ (%)	Заз. тип K1L2 $\times l$	R ( $\Omega$ )	$E_d$ (%)	$E_c$ (%)	Заз. тип K1L4 $\times l$	R ( $\Omega$ )	$E_d$ (%)	$E_c$ (%)
$R_1=1,2 \text{ m}$	15,57	28,7	28,4	$l=1 \text{ m}$	/	/	/	$l=1 \text{ m}$	/	/	/
$R_1=1,4 \text{ m}$	14,77	25,1	26,3	$l=2 \text{ m}$	13,43	24,0	27,0	$l=2 \text{ m}$	11,81	20,0	23,6
$R_1=1,6 \text{ m}$	13,72	23,6	24,9	$l=3 \text{ m}$	12,10	22,5	26,1	$l=3 \text{ m}$	10,09	17,4	21,1
$R_1=1,8 \text{ m}$	12,80	23,3	23,8	$l=4 \text{ m}$	10,96	21,6	25,3	$l=4 \text{ m}$	8,77	15,6	19,3
$R_1=2,0 \text{ m}$	11,98	23,6	22,9	$l=5 \text{ m}$	10,00	20,9	24,6	$l=5 \text{ m}$	7,76	14,3	17,9
$R_1=2,2 \text{ m}$	11,23	24,0	22,6	$l=6 \text{ m}$	9,19	20,2	24,0	$l=6 \text{ m}$	6,95	13,2	16,7
$R_1=2,4 \text{ m}$	10,60	24,5	22,6	$l=7 \text{ m}$	8,49	19,7	23,5	$l=7 \text{ m}$	6,30	12,3	15,8
$R_1=2,6 \text{ m}$	10,03	25,0	22,6	$l=8 \text{ m}$	7,90	19,3	23,0	$l=8 \text{ m}$	5,76	11,6	15,0
$R_1=2,8 \text{ m}$	9,52	25,4	22,6	$l=9 \text{ m}$	7,38	18,9	22,6	$l=9 \text{ m}$	5,31	11,0	14,3
$R_1=3,0 \text{ m}$	9,06	25,8	22,7	$l=10 \text{ m}$	6,93	18,5	22,2	$l=10 \text{ m}$	4,92	10,4	13,8

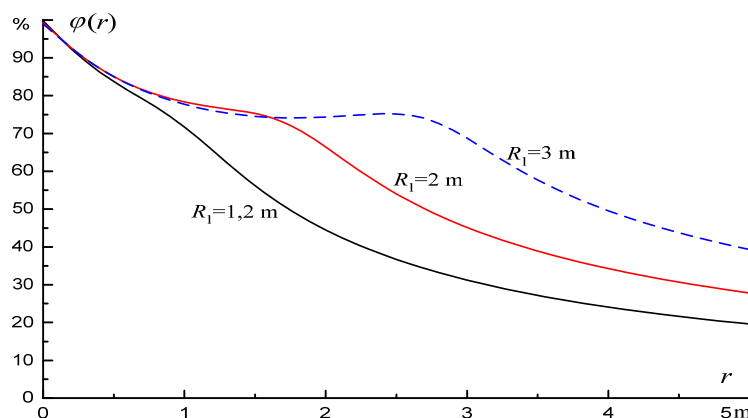
Табела 6.6. Карактеристики на двоконтурните комбинирани заземјувачи од фамилијата K2

Заз. тип K2	$R$ ( $\Omega$ )	$E_d$ (%)	$E_c$ (%)
$R_2=2,2$ m	10,50	14,4	20,4
$R_2=2,7$ m	9,18	14,1	18,1
$R_2=3,2$ m	8,16	14,3	16,8
$R_2=3,7$ m	7,34	14,5	16,0
$R_2=4,2$ m	6,68	14,7	15,9
$R_2=4,7$ m	6,14	14,9	15,8
$R_2=5,2$ m	5,68	15,0	15,8
$R_2=5,7$ m	5,29	15,2	15,8
$R_2=6,2$ m	4,96	15,3	15,8
$R_2=6,7$ m	4,66	15,5	15,9

Заз. тип K2L2 $\times$ l	$R$ ( $\Omega$ )	$E_d$ (%)	$E_c$ (%)
$l=1$ m	/	/	/
$l=2$ m	9,49	12,9	19,8
$l=3$ m	8,88	12,4	19,3
$l=4$ m	8,30	12,0	18,9
$l=5$ m	7,78	11,6	18,6
$l=6$ m	7,31	11,3	18,2
$l=7$ m	6,88	11,0	17,9
$l=8$ m	6,50	10,8	17,6
$l=9$ m	6,16	10,6	17,3
$l=10$ m	5,86	10,4	17,1

Заз. тип K2L4 $\times$ l	$R$ ( $\Omega$ )	$E_d$ (%)	$E_c$ (%)
$l=1$ m	/	/	/
$l=2$ m	8,71	11,6	18,1
$l=3$ m	7,81	10,7	16,8
$l=4$ m	7,04	9,3	15,6
$l=5$ m	6,39	9,3	14,7
$l=6$ m	5,85	8,8	13,9
$l=7$ m	5,39	8,3	13,3
$l=8$ m	5,00	8,0	12,7
$l=9$ m	4,66	7,6	12,2
$l=10$ m	4,36	7,2	11,8

На сликата 6.22 е прикажана распределбата на потенцијалите по површината на земјата во било кој правец за три заземјувачи од фамилијата K1. Од неа се гледа, како што тоа впрочем може да се види и од табелата 6.5, дека од аспект на обликување на потенцијалот најповолно е контурата од заземјувачот тип K1 (или тип P1) да има радиус од околу  $2 \div 3$  m, што е во спротивност со досега врежаната идеја и применуваната практика прстенот да се прави така што тој да биде оддалечен на растојание од околу 1 m од работ на столбот.



Слика 6.22. Распределба на потенцијалите по површината од земјата за заземјувачите од типот K1 со различни димензии на контурата

### 6.3.2. Карактеристики на типските заземјувачи за 110 kV столбови и повисоко

Во нашата практика заземјувачите на столбовите за висок и највисок напон ( $U_n \geq 110$  kV) се изведуваат според изложеното во претходниот дел. Столбовите од високонапонските водови најчесто имаат четири расчленети темели – по еден за секоја нога (сл. 6.10 и сл. 6.12). Околу секоја стопа се изведуваат по два правоагли прстена (слика 6.11) и на тој начин се добива основната конфигурација на заземјувачот, означена како заземјувач тип А. Кога условите за безбедност тоа го бараат (населено место, близина на пат и слично), тогаш на конфигурацијата А, околу сите четири стопа, се додава уште една правоаголна контура (слика 6.13) и на тој начин се добива заземјувачот тип В.

Со додавање на хоризонтални краци (по два или по четири) на основните конфигурации А и В се добиваат 4 фамилии типски заземјувачи:  $A2 \times l$ ;  $A4 \times l$ ;  $B2 \times l$ ; и  $B4 \times l$ . (слика 6.18 и слика 6.19). Хоризонталните краци ја намалуваат отпорноста на распростирање  $R_z$  на стол-



бот. Се додаваат во услови кога столбот се наоѓа на терен со висока специфична отпорност  $\rho$  и е истовремено прилично изложен на директни атмосферски празнења.

Во натамошниот дел ќе бидат прикажани основните карактеристики на вкупно  $2 \times 8 = 16$  различни типови заземјувачи за 110 kV надземни водови. Заедничко за сите од разгледуваните заземјувачи е тоа што околу секоја од четирите стопи на темелот, се поставуваат по два прстена (контури) во форма на квадрат со страница  $a=1,4$  m. Првиот прстен е предвиден да се постави на длабочина од 0,5 m, додека вториот, на потребната длабочина, во склад со длабочината на стопата, која кај носечките столбови во просек изнесува 2,5 m.

Освен прстените, поставени околу секоја стопа, кај мнозинството од избраните типски заземјувачи е предвидено и дополнително поставување на хоризонтални краци кои се закопуваат на длабочина од 0,8 m. Тие ќе имаат променлива должина: 5, 10, 15, ... 40 m, зависно од специфичната отпорност на тлото во кое се поставува заземјувачот и големината на отпорноста на распростирање што сакаме да го постигнеме.

Заземјувачите од фамилијата "B" покрај прстените, поставени околу секоја стопа, имаат уште еден дополнителен прстен (контура) на длабочина од 0,8 m, со кој се опфатени сите 4 стопи од темелот. Овој прстен исто така има форма на квадрат со променлива страница  $D_B$ , а неговата димензија зависи од меѓусебното растојание на стопите, т.е. повторно зависи од височината на столбот и носивоста на тлото. Се поставува така што ќе се наоѓа на хоризонтална оддалеченост 1 m од страниците на столбот. Пресметките на карактеристиките на заземјувачите од фамилијата "B", прикажани во табелите 6.7а и 6.7б се вршени за просечна вредност на растојанието помеѓу стопите  $S = 4$  m ( $D_B = 6$  m).

И кај заземјувачите на столбовите за висок и највисок напон ( $U_n \geq 110$  kV), слично како и кај претходните заземјувачи, се врши "типизација". Секој тип заземјувач има своја ознака и свои карактеристики. Првите 16 типови заземјувачи се без заеднички правоаголен прстен околу стопите на столбот, и тие во својата ознака започнуваат со буквата "A". Вторите 16 типови заземјувачи имаат заеднички правоаголен прстен во форма на квадрат со страница  $D_B$  (табелите 6.8а и 6.8б се однесуваат на случајот  $D_B = 6$  m), закопан на длабочина 0,8 m. Во својата ознака, тие започнуваат со латиничната буква "B" и се наменети за оние столбни места кај кои луѓето (или животните) имаат лесен пристап (близина на пат, населено место и сл). Со вметнувањето на заедничкиот прстен околу сите 4 стопи се врши незначително намалување на отпорноста на распростирање на заземјувачот, но прстенот се поставува заради обликување на потенцијалот во околината на столбот, со цел да се намали ризикот од појава на преголеми напони на чекор односно допир при појава на куси врски на водот<sup>3</sup>.

Од заземјувачите од типот "A" и "B" се развиени повеќе поттипови. Секој од поттиповите има по два или по четири дополнителни хоризонтални краци, со определена должина  $l$ , закопани на длабочина  $h_l = 0,8$  m.

Должината  $l$  на секој од краците може да изнесува 5, 10, 15, ... 40 метри. Така, на пример, ознаката "A2×15" кажува дека се работи за заземјувач од типот "A" кој има уште два дополнителни хоризонтални крака и притоа секој има должина од по 15 метри (сл. 6.18), додека ознаката "B4×10" кажува дека се работи за заземјувач од типот "B" кој покрај заедничкиот прстен околу сите четири стопи има уште четири дополнителни хоризонтални краци, секој со должина од по 10 m (сл. 6.19).

---

<sup>3</sup> Во некои случаи, кога столбот се наоѓа во непосредна близина на пат, населено место и слично, во согласност со одредбите од Правилникот е неопходно да се изврши обликување на потенцијалот во неговата околина со поставување на дополнителен заеднички прстен околу сите 4 стопи. Тогаш, на таквото столбно место е неопходно да се примени еден од облиците на заземјувачи кои припаѓаат на фамилијата "B".

**Табела 6.7.а. Карактеристики на заземјувачите од фамилијата "А"**

Реден број	Заземјувач тип	$R_Z$ ( $\Omega$ )	Одведување од лентите $I_L$ (%)	Одведување од стопите $I_S$ (%)	Вкупна должина $L_\Sigma$ (m)	Вкупно ископ, $Q$ (m <sup>3</sup> )	Цена $C$ (EUR)
1	А	6,50	/	100,0	/	/	115
2	A210	4,86	42,2	57,8	24,40	6,85	200
3	A215	4,11	54,6	45,4	34,40	10,05	285
4	A220	3,54	62,8	37,2	44,40	13,25	370
5	A225	3,11	68,6	31,4	54,40	16,45	455
6	A230	2,78	72,8	27,2	64,40	19,65	540
7	A235	2,51	76,2	23,8	74,40	22,85	625
8	A240	2,29	78,8	21,2	84,40	26,05	710
9	A405	5,35	39,8	60,2	28,80	7,30	220
10	A410	4,04	64,0	36,0	48,80	13,70	390
11	A415	3,20	75,8	24,2	68,80	20,10	560
12	A420	2,63	82,4	17,6	88,80	26,50	730
13	A425	2,24	86,6	13,4	108,80	32,90	900
14	A430	1,95	89,4	10,6	128,80	39,30	1070
15	A435	1,73	91,2	8,8	148,80	45,70	1235
16	A440	1,56	92,6	7,4	168,80	52,10	1405

**Табела 6.7.б. Карактеристики на заземјувачите од фамилијата "В"**

Реден број	Заземјувач тип	$R_Z$ ( $\Omega$ )	Одведување од лентите $I_L$ (%)	Одведување од стопите $I_S$ (%)	Вкупна должина $L_\Sigma$ (m)	Вкупно ископ, $Q$ (m <sup>3</sup> )	Цена $C$ (EUR)
1	В	5,97	/	70,8	32	10,2	200
2	B210	4,70	38,6	44,8	56	17,3	285
3	B215	4,01	51,4	35,6	66	20,5	370
4	B220	3,47	60,2	29,2	76	23,7	455
5	B225	3,06	66,2	24,2	86	26,9	540
6	B230	2,74	70,8	21,6	96	30,1	625
7	B235	2,48	74,4	18,8	106	33,4	710
8	B240	2,26	77,0	16,6	116	36,5	795
9	B405	5,19	34,6	48,4	60	18,6	310
10	B410	3,99	60,8	29,8	80	25,0	480
11	B415	3,18	73,6	20,4	100	31,4	650
12	B420	2,62	81,0	14,8	120	37,8	820
13	B425	2,24	85,4	11,0	140	44,2	990
14	B430	1,95	88,6	8,5	160	50,6	1160
15	B435	1,73	90,6	7,2	180	57,0	1325
16	B440	1,56	92,2	6,2	200	63,4	1600

Основните карактеристики на разгледуваните типски заземјувачи се прикажани во табелите 6.7.а и 6.7.б. Во нив се прикажани следните величини: отпорноста на распространување на заземјувачот  $R'_Z$  ( $\Omega$ ) во услови кога е тој поставен во хомогено тло со специфична отпорност  $\rho = 100 \Omega\text{m}$ ; процентуалното учество на хоризонталните ленти  $I_L$  (%) во одведувањето на струјата во земја; процентуалното учество во одведувањето на струјата на стопите и прстените од основниот заземјувач  $I_S$  (%); вкупната должина на валчестото поцинкувано железо  $\Phi 10$  од кое е формиран разгледуваниот заземјувач  $L_\Sigma$  (m) и вкупното

количество земја (ископ)  $Q$  ( $m^3$ ) што треба да се ископа за да се изведе заземјувачот. При определувањето на ископот  $Q$  се претпоставило дека ровот во кој ќе се поставуваат хоризонталните краци  $l$  и заедничкиот прстен (кај заземјувачите од фамилијата "B"), има форма на паралелолипед со висина 0,8 m, ширина 0,4 m и должина  $l$  – респективно. При пресметувањето на цените за изведба на одделните типови заземјувачи се користени податоците за вообичаените единечните цени за ископот, лентите, бентонитот и градежните работи и др.

#### 6.4. УДАРНА ОТПОРНОСТ НА РАСПРОСТИРАЊЕ НА ЗАЗЕМЈУВАЧИТЕ

Првенствена задача на заземјувачите од столбовите на надземните водови е заштита од атмосферските пренапони. Затоа мерка за перформансите на ваквите заземјувачи е нивната импулсна отпорност  $R_i$ , која се нарекува и ударна импеданција. Таа се дефинира како однос помеѓу максималната вредност на импулсниот напон на заземјувачот  $U_M$  и максималната вредност на импулсната струја  $I_M$  која го предизвикала тој напон. Ударната импеданција е пропорционална на отпорот на распростирање на заземјувачот мерен со неизменична струја со индустриска фреквенција  $R_Z$ , т.е.:

$$R_i = \alpha \cdot R_Z. \quad (6.3)$$

Факторот на пропорционалност  $\alpha$ , којшто се нарекува "импулсен коефициент", има поголеми вредности кај подолгите заземјувачи, поголемите струи и поголемите специфични отпорности на плото. Кај таквите заземјувачи преовладува нивната индуктивност која за стрмни струјни импулси ја зголемува ударната импеданција на заземјувачот.

Заземјувачите од столбовите на надземните водови за среден напон (10, 20 и 35 kV) па дури и заземјувачите на 110 kV надземни водови кои се без дополнителни хоризонтални краци се по димензии мали и кај нив индуктивноста има незначително влијание врз импулсниот коефициент така што може, без голема грешка, да се земе дека  $\alpha \approx 1$ , т.е.  $R_i \approx R_Z$ . Но кај пространите заземјувачи, особено оние со долги хоризонтални зраци тоа не е можно.

##### 6.4.1. Импулсни коефициенти на долгите хоризонтални заземјувачи

Во почвите со висока специфична отпорност  $\rho$  тешко се постигнува мала отпорност на заземјувачите со стандардни, т.е. вообичаени димензии. Затоа, во тие случаи, се применуваат долги хоризонтални заземјувачи во форма на ленти (траки). Еден таков заземјувач можеме да го замислиме како вод со рамномерно распределени параметри и процесите што се одвиваат кај него во импулсниот период да ги третираме како бранови процеси на вод. Таквиот вод има свои подолжни параметри: подолжна активна отпорност  $R_1$ , подолжна индуктивност  $L_1$ , подолжна капацитивност  $C_1$  и подолжна одводност (кондуктација)  $G_1$ . Неговата бранова импеданција  $Z_C$  и брзината на простирање на брановите по него,  $v$ , се пресметуваат слично како и во случајот со надземен вод (изрази (4.9) ÷ (4.14)), со помош на следните изрази:

$$Z_C = 60 \cdot \ln \frac{2l}{d} \text{ (}\Omega\text{)}; \quad v = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon \cdot \mu}} = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_r \cdot \mu_r}} \cdot \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \cdot \mu_0}} = \frac{v_0}{\sqrt{\varepsilon_r \cdot \mu_r}}; \quad v_0 = 3 \cdot 10^8 \left( \frac{m}{s} \right) \quad (6.4)$$

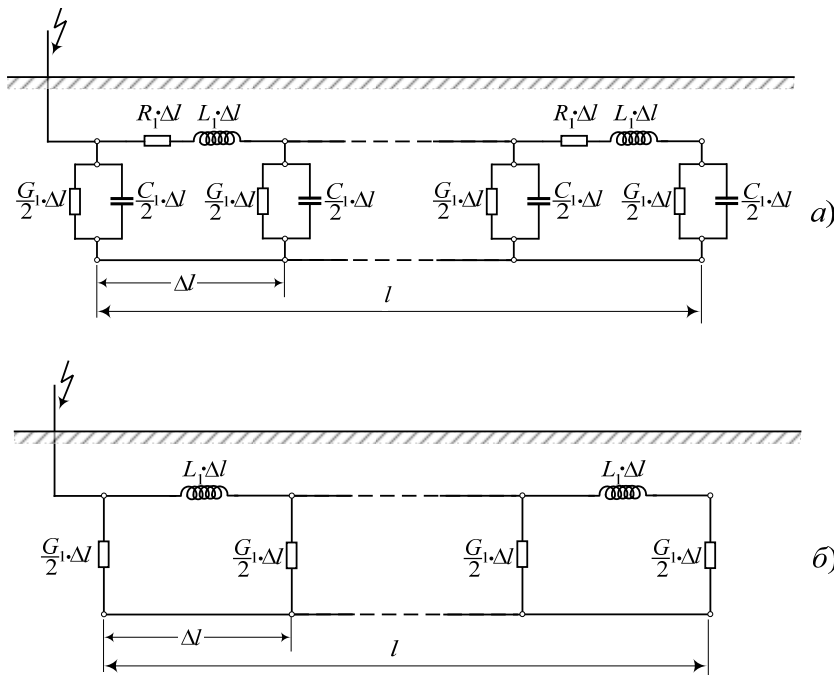
во кои  $l$  со  $d$  се означени должината и пречникот на заземјувачот.

Почвата во која што се наоѓа заземјувачот, како и секој друг медиум, има своја специфична отпорност  $\rho$ , диелектрична константа  $\varepsilon = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r$  и магнетска пермиабилност  $\mu$ . Специфичната отпорност  $\rho$  зависи од типот на почвата и се менува од неколку десетини  $\Omega m$  до неколку илјади  $\Omega m$ . Магнетската пермиабилност  $\mu$  на земјата е приближно еднаква на онаа на воздухот, т.е.  $\mu = \mu_0 \cdot \mu_r \approx \mu_0$  ( $\mu_r = 1$ ), додека релативната диелектрична константа  $\varepsilon_r$  на плото силно зависи од неговата влажност и варира од  $\varepsilon_r = 1$  за сосема суви почви до  $\varepsilon_r = 80$  за почви целосно заситени со вода.

Подолжниот параметар  $R_1$ , како малку влијателен, може слободно да се занемари. Останатите подолжни параметри на заземјувачот  $L_1$ ,  $C_1$  и  $G_1$  се пресметуваат со помош на следните формули:

$$L_1 = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \ln \frac{2l}{d}; \quad C_1 = 2\pi \varepsilon_0 \varepsilon_r \cdot \ln^{-1} \frac{2l}{d}; \quad G_1 = \frac{\pi}{\rho} \cdot \ln^{-1} \frac{l}{\sqrt{d \cdot h}} \quad (6.5)$$

Во согласност со теоријата на водовите, на секој еден таков заземјувач по којшто протекува струјата на громот му припаѓа соодветен "повратен спроводник", поставен на определено растојание, паралелно со заземјувачот. Еквивалентата шема на еден таков заземјувач со должина  $l$  може да се претстави со една верига (ланец) од четворополи, како што е тоа прикажано на сликата 6.24а. Притоа секој од концентрираните четворополи заменува парче од заземјувачот со должина  $\Delta l$ .



Слика 6.24. Долг хоризонтален заземјувач и негова приближна претстава

Ако редната отпорност  $R_1 \cdot \Delta l$  како и попречната капацитивност  $C_1 \Delta l / 2$  ги испуштиме од шемата на сл. 6.24а, како малку влијателни во однос влианието на индуктивноста  $L_1 \Delta l$  и активната одводност  $G_1 \Delta l$  врз простирањето на струјните и напонски бранови, тогаш ќе ја добиеме упростената заменска шема од слика 6.24б. На тој начин процесите во долгите заземјувачи се решаваат на многу поедноставен начин без притоа да се изгуби во точноста во поголема мера.

Да опишеме сега што се случува кога струјниот импулс на громот со голема стрмнина се втиснува во еден ваков заземјувач. На челото на струјниот бран, кога промената на струјата е голема, индуктивноста на заземјувачот, која што е физички сврзана со создавањето на магнетскиот флуks во просторот околу заземјувачот, го спречува рамномерното истекување на струјата од заземјувачот во околната почва по целата негова должина. Затоа струјата е принудена да се одведува во земјата само од првите неколку метри на заземјувачот. Значи, индуктивноста на заземјувачот, која не дозволува да се активира целата негова должина, всушност се спротивставува на напредувањето на струјата по неговата должина, т.е. ја зголемува неговата отпорност на распространување.

Разликата помеѓу импулсната (ударната) отпорност на распростирање  $R_i$  и неговата отпорност  $R_Z$  со која што тој се спротивставува на обичните наизменични струи 50 Hz, многу зависи од стрмината на струјата на громот  $S = di/dt$ . Струите на громот со поголема стрмина потешко ќе продираат во заземјувачот бидејќи тогаш неговата индуктивна отпорност доаѓа повеќе до израз. Колку е стрмината  $S$  поголема, односно времето на чело на струјниот импулс  $T_c$  покусо, толку ќе биде потребно подолго време да измине за струјата да продре по целата должина на заземјувачот. Значи индуктивноста на заземјувачот оневозможува, барем додека трае челото на импулсот, целата должина на заземјувачот да учествува во одведувањето на струјата на громот.

Од изложеното произлегува заклучокот дека при одведувањето на струјата на громот во земјата не учествува секогаш целата должина на заземјувачот туку само еден негов дел. Затоа и импулсната отпорност на распростирање  $R_i$  е поголема од конвенционалната вредност на отпорноста  $R_Z$ . Подоцна ќе видиме дека при одведувањето на големите струи на громот во земјата, поради процесите на искрење и пробив на земјиштето околу заземјувачот, врз вредноста  $R_i$  влијае уште и големината на струјата на громот.

За да ја пресметаме импулсната отпорност на распростирање  $R_i$  ќе биде потребно да ја пресметаме т.н. "активна должина" на заземјувачот  $l_a$ . Неа ја добиваме со помош на изразот:

$$l_a = \sqrt{\frac{T_c}{G_1 \cdot L_1}} \quad (\text{m}) \quad (6.6)$$

Со помош на овој израз е можно да се оцени дали за време на челото еден долг заземјувач со дадена должина  $l$  ќе ја одведува струјата на громот во земјата со целата своја должина или пак тоа ќе го прави само со еден нејзин дел  $l_a$ , што ќе доведе до зголемување на зголемување на импулсната отпорност на распростирање. Значи, доколку е  $l > l_a$ , тогаш во импулсниот период на челото заземјувачот ќе учествува во одведувањето на струјата само со својата активна должина  $l_a$ . Обратно, доколку е  $l < l_a$ , тогаш заземјувачот за целото време ќе дејствува со својата вкупна должина и тогаш ќе биде  $R_i = R_Z$ .

Пресметувањето на големината на ударната отпорност  $R_i$  го олеснува фактот што подолжната индуктивност на заземјувачот  $L_1$  за заземјувачите во сите видови земја е практично константна и се менува во многу тесен интервал, во границите од 1 до 2  $\mu\text{H/m}$ . Затоа ударната отпорност  $R_i$  може да се пресмета само како функција од вкупната конвенционална одводност на заземјувачот  $G = G_1 \cdot l$  и времето на чело  $T_c$  (т.е. стрмината  $S = di/dt$ ). Нејзината приближна вредност може да се добие со помош на следниот израз:

$$R_i = \frac{1}{G_1 \cdot l} \quad \text{за } T_c > 1,49 \cdot G_1 \cdot l^2, \quad (6.7)$$

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

Значи големината на ударната отпорност на распростирање  $R_i$  зависи од параметрите на заземјувачот  $G_1$  и  $l$ , но зависи и од должината на челото на струјниот бран. Кога сакаме да ги земеме најнеповолните околности што можат да се јават во стварноста најчесто усвојуваме  $T_c = 1 \mu\text{s}$  и со оваа вредност ја определуваме ударната отпорност на распростирање  $R_i$  на заземјувачот.

**Пример 6.1.** Поцинкувана челична лента FeZn 30x4 со должина  $l = 10 \text{ m}$  е закопана на длабочина  $h = 0,7 \text{ m}$  во хомогено тло со специфична отпорност  $\rho = 100 \Omega\text{m}$ . Да се пресмета конвенционалната отпорност на распростирање  $R_Z$  и ударната отпорност  $R_i$  за случајот кога струјниот импулс на громот има стандарден облик 1,2/50 и амплитуда  $I_M = 25 \text{ kA}$ . Колкав е

импулсниот коефициент  $\alpha$  на заземјувачот. Колкава ќе биде амплитудата на напонот на заземјувачот  $U_M$ . Пресметките да се повторат и за случајот кога должината на лентата изнесува  $l = 20$  m.

**Решение:**

Отпорноста на распространяње за струја 50 Hz изнесува:

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

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

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

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

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

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

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

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

$$R_i = \frac{1}{G_1 \cdot l} = R_Z = 14 \Omega.$$

Значи импулсниот коефициент во случајов ќе биде  $\alpha = 1$ .

Амплитудата на напонот на заземјувачот  $U_M$  ќе ја добиеме како производ од неговата импулсна отпорност и темената вредност на струјата  $I_M$ :

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

Во случајот кога должината на лентата изнесува  $l = 20$  m ќе имаме:

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

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

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

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

Бидејќи во овој случај  $1,49 \cdot G_1 \cdot l^2 = 3,67 > T_c$  импулсната отпорност на заземјувачот ќе биде:

$$R_i = \frac{1,21}{\sqrt{G_1 \cdot T_c}} = \frac{1,21}{\sqrt{0,006171 \cdot 1,2}} = 14 \Omega \approx 1,75 \cdot R_Z.$$

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

$$\alpha = 1,75.$$

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

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

а тоа е истата вредност што се постигнува кај претходниот заземјувач со должина  $l = 10 \text{ m}$ . Овој резултат само го потврдува фактот дека во импулсниот режим заземјувачите учествуваат во одведувањето на струјата на громот само со својата активна должина. Затоа во ваквите случаи, кога вистинската должина на заземјувачот е поголема од активната, пресметките на импулсните пренапони и димензионирањето на самите заземјувачи се вршат со ударната отпорност  $R_i$ .



**Пример 6.2.** Заземјувач во форма на трикрака ѕвезда, составен од три поцинкувани челични ленти FeZn 30x4 ( $n = 3$ ), секоја со должина  $l = 20 \text{ m}$ , е закопан на длабочина  $h = 0,7 \text{ m}$  во хомогено тло со специфична отпорност  $\rho = 200 \text{ }\Omega\text{m}$ . Да се пресмета конвенционалната отпорност  $R_Z$  а потоа и ударната отпорност  $R_i$  на распростирање на заземјувачот за случајот кога времето на чело изнесува  $T_c = 1,2 \text{ }\mu\text{s}$ .

*Решение:*

**Пресметка на конвенционалната отпорност на заземјувачот**

Отпорноста на распростирање на еден крак од заземјувачот  $R_{1l}$  ќе биде:

$$R_{1l} = \frac{\rho}{\pi \cdot l} \cdot \ln \frac{l}{\sqrt{h \cdot d}} = \frac{200}{\pi \cdot 20} \cdot \ln \frac{20}{\sqrt{0,7 \cdot 0,022}} = 16,204 \text{ }\Omega.$$

Приближната вредност на конвенционалната отпорност на распростирање на комплетниот заземјувач во форма на трикрака ѕвезда, за струја 50 Hz, изнесува (видете ја задачата бр. 6.1):

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

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

Отпорноста  $R_Z$  во овој случај (на идеална симетрија на заземјувачот) може да се пресмета и на друг начин, со помош на следната формула:

$$R_Z = \frac{1}{\eta} \cdot \frac{R_{1l}}{n},$$

од каде што за коефициентот на искористување на заземјувачот  $\eta$ , во овој случај, се добива:

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

**Пресметка на импулсната отпорност на заземјувачот**

Импулсната отпорност на распространување на еден крак од заземјувачот  $R_{li}$  ќе се добие со наполно истата постапка како и во претходниот пример. На тој начин ќе добиеме:

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

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

Бидејќи коефициентот на искористување на заземјувачот  $\eta$  е приближно ист како за нормален режим ( $f = 50 \text{ Hz}$ ) така и за импулсен режим, т.е.  $\eta_i = \eta = 0,768$ , тогаш следува дека и импулсниот коефициент  $\alpha$  на целиот заземјувач ќе биде еднаков на коефициентот  $\alpha_1$ . На тој начин се добива:

$$R_i = \alpha \cdot R_z = 1,23 \cdot 7,028 = 8,625 \text{ } \Omega.$$



**Пример 6.3.** Колкави ќе бидат отпорностите на распространување  $R_z$ ,  $R_i$  и импулсниот коефициент  $\alpha$  на заземјувачот во форма на трикрака ѕвезда од примерот 6.2 ( $n=3$ ;  $l=20 \text{ m}$ ;  $h=0,7 \text{ m}$ ) кога е тој поставен во тло со разни вредности на специфичната отпорност во интервалот  $50 \text{ } \Omega\text{m} \leq \rho \leq 500 \text{ } \Omega\text{m}$ . Пресметките да се направат за три вредности на времето на чело: а)  $T_c = 1,2 \text{ } \mu\text{s}$  б)  $T_c = 2,5 \text{ } \mu\text{s}$  и в)  $T_c = 5 \text{ } \mu\text{s}$  а резултатите да се прикажат табеларно и графички.

**Решение:**

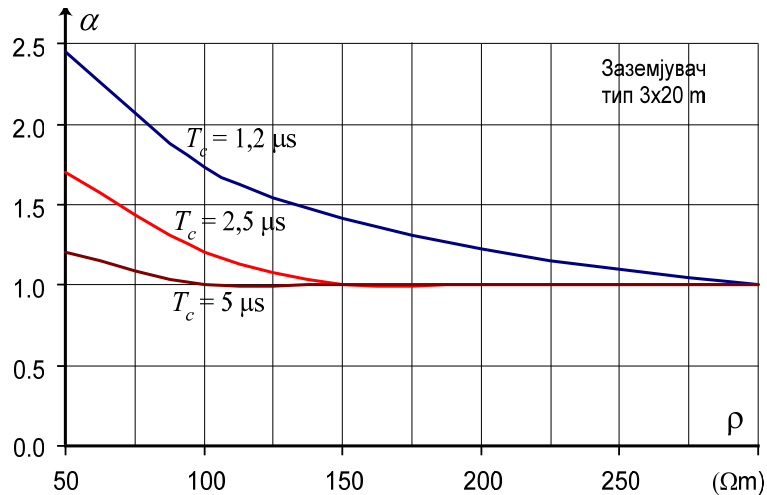
**Пресметка на конвенционалната отпорност на заземјувачот**

Со постапка идентична на онаа од примерот 6.2 се врши пресметување на бараните величини  $R_z$ ,  $R_i$  и  $\alpha$  на заземјувачот за секој од наведените случаи. Резултатите од пресметките се смесени во табелата 1 и на сликата 1.

**Табела 1. Зависност на  $R_z$ ,  $R_i$  и  $\alpha$  на заземјувач тип L3 во форма на трикрака ѕвезда (3x20 m)**

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





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



#### 6.4.2. Јонизација и електрични празнења во тлото

Од претходниот пример се гледа дека ударните ефекти на струјата на громот што се должат на индуктивноста на заземјувачите се изразени кај стрмните импулси, со мали времиња на челото, и во почви со релативно ниска специфична отпорност  $\rho$ . Во земјиштата со висока специфична отпорност овие ефекти практично сосема изостануваат и индуктивноста на заземјувачот скоро и да не доаѓа до израз. Но тогаш се јавуваат други ефекти кои по своето влијание имаат обратно дејство врз големината на ударната отпорност, т.е. доведуваат до нејзино намалување.

Струјата на громот што се одведува од заземјувачот во земјата е голема, од редот на големина на неколку десетици kA, па дури до стотина kA. Толкави големи струи во земјата создаваат силно електрично поле кое може да предизвика електрично искрење и празнење во земјата. Кога се работи за мали струи на одведување од заземјувачот (мали јачини на електричното поле  $E$  во земјата) влијанието на јонизацијата и електричното празнење во тлото, кои доведуваат до намалување на отпорноста на заземјувачот, не се изразени. Обратно, кај големите струи на одведување и големите специфични отпорности на тлото, во него се воспоставуваат јаки електрични полиња кои доведуваат до негова јонизација па дури и празнење преку електричен лак. До јонизација доаѓа при јачини на полето од редот на 2–4 kV/cm додека празнењето преку лак се случува при поголеми јачини на полето, од редот на големина 6–10 kV/cm. Обете споменати појави ја намалуваат импулсната отпорност на заземјувачот така што во тие случаи неговиот импулсен коефициент  $\alpha < 1$ .

Празнењето на громот во надземниот вод предизвикува инјектирање на струјни импулси во заземјувачите од столбовите и иницира сложен електромагнетен преоден процес којшто има бранов карактер и чијашто анализа е прилично сложена. Многу трудови се бавеле со пресметката на овие процеси, но повеќето од нив базирале на примената на упрости модели кои не ги уважувале јонизационите процеси на тлото. Процесите на празнење во тлото во околината на заземјувачките електроди започнуваат да се опфаќаат во анализите дури во последно време.

Може да се каже дека тие сè уште не се доволно проучени така што единствена употреблива опција, барем засега, претставуваат експерименталните истражувања на реалните заземјувачи и симулациите, т.е. експериментите на модели. Првите се можни кога се работи за заземјувачи со мали димензии (т.н. концентрирани заземјувачи). Кога станува збор за

пространите заземјувачи со значителни димензии, какви што можат да бидат и зракастите заземјувачи на столбовите од надземните водови, истражувањето на нивните импулсни карактеристики, заради просторните проблеми, најчесто се врши на нивни модели.

**Табела 6.9. Анализирани конфигурации заземјувачи при експерименталните истражувања во [16]**

<i>Тип</i>	<i>Скица на заземјувачот</i>	<i>Опис на заземјувачот</i>
<i>a</i>		Заземјувач за челично-решеткасти столбови, наменет за терени со ниска ( $l = 0$ ) и висока ( $l > 0$ ) спец. отпорност $\rho$ . ( $S = 8 - 10$ m; $l = 0 - 50$ m)
<i>b</i>		Заземјувач за портални столбови, наменет за терени со низок специфична отпорност $\rho$ . ( $S = 0 - 15$ m)
<i>c</i>		Заземјувач за портални столбови, наменет за терени со висок специфичен отпор $\rho$ . ( $d = 10$ m; $l = 5 - 53$ m)
<i>d</i>		Заземјувач за обични, едно-стоечки бетонски и челично-реш. столбови. ( $l = 5 - 100$ m)
<i>e</i>		Заземјувач за обични, едно-стоечки бетонски и челично-решетк. столбови.
<i>f</i>		Вертикален заземјувач за обични, едно-стоечки бетонски и челично-решеткасти столбови. ( $l = 5 - 60$ m)

#### 6.4.3. Импулсни коефициенти на типските заземјувачи на НВ

И покрај тоа што во стручната литература се среќаваат мноштво емпириски формули, дијаграми и табели, за пресметување на импулсните коефициенти кои се погодни за брзи и практични пресметки (т.е. проценки) на импулсната отпорност на разните видови заземјувачи овде ќе бидат презентирани емпириски формули за пресметка на импулсниот коефициент  $\alpha$ , добиени на база на регресиона анализа на резултатите од експерименталните истражу-

вања на импулсните карактеристики на поголем број типски конфигурации заземјувачи на столбовите од НВ, (табела 6.9) добиени со мерења на модели во размер, вршени во Н.Р. Кина [16]. Експериментите за кои што станува збор се вршени во Лабораторијата за заземјувачки технологии при Универзитетот во Чонгкинг.

Со примена на регресиона анализа на така добиените експериментални резултати се добиени емпириски изрази за пресметка на импулсните коефициенти на разните класи типски заземјувачи. Вака добиените резултати се споредувани со резултатите од мерењата на импулсните карактеристики на реални заземјувачи (full-scale experiments) и на тој начин е верифицирана нивната употребна вредност. Потврдени како успешни, тие денес се вградени во кинеските национални стандарди за проектирање на заземјувачи ([16]).

За разните типови заземјувачи, означени во табелата 6.9 со буквите  $a, b, c, d, e$  и  $f$ , изведени се емпириски изрази за пресметка на импулсните коефициенти  $\alpha$  за разни вредности на специфичната отпорност на тлото  $\rho$  ( $\Omega\text{m}$ ), параметарот  $l$  (m), кој претставува должина на секоја од лентите и темената вредност на импулсната струја на громот  $I_M$  (kA). Ти го имаат општиот облик (6.8) и се дадени со следните изрази:

$$\alpha = a \cdot \rho^{-p} \cdot (b + \sqrt{l}) \cdot (c - e^{-d \cdot I_M^q}) \quad \text{општ модел} \quad (6.8)$$

$$\alpha = 0.74 \cdot \rho^{-0.4} \cdot (7.0 + \sqrt{l}) \cdot (1.56 - e^{-3.0 \cdot I_M^{0.4}}) \quad \text{за типот } a \quad (6.9)$$

$$\alpha = 2.94 \cdot \rho^{-0.5} \cdot (6.0 + \sqrt{l}) \cdot (1.23 - e^{-2.0 \cdot I_M^{0.3}}) \quad \text{за типот } b \quad (6.10)$$

$$\alpha = 1.36 \cdot \rho^{-0.4} \cdot (1.3 + \sqrt{l}) \cdot (1.55 - e^{-4.0 \cdot I_M^{0.4}}) \quad \text{за типот } c \quad (6.11)$$

$$\alpha = 1.62 \cdot \rho^{-0.4} \cdot (5.0 + \sqrt{l}) \cdot (0.79 - e^{-2.3 \cdot I_M^{0.2}}) \quad \text{за типот } d \quad (6.12)$$

$$\alpha = 1.16 \cdot \rho^{-0.4} \cdot (7.1 + \sqrt{l}) \cdot (0.78 - e^{-2.3 \cdot I_M^{0.2}}) \quad \text{за типот } e \quad (6.13)$$

$$\alpha = 2.75 \cdot \rho^{-0.4} \cdot (1.8 + \sqrt{l}) \cdot (0.75 - e^{-1.5 \cdot I_M^{0.2}}) \quad \text{за типот } f \quad (6.14)$$

Со така пресметаните импулсни коефициенти  $\alpha$  може да се пресмета и вредноста на импулсната отпорност на заземјувачот за произволни вредности на било кој од параметрите  $\rho, l$  и  $I_M$ , со помош на релацијата (6.3):

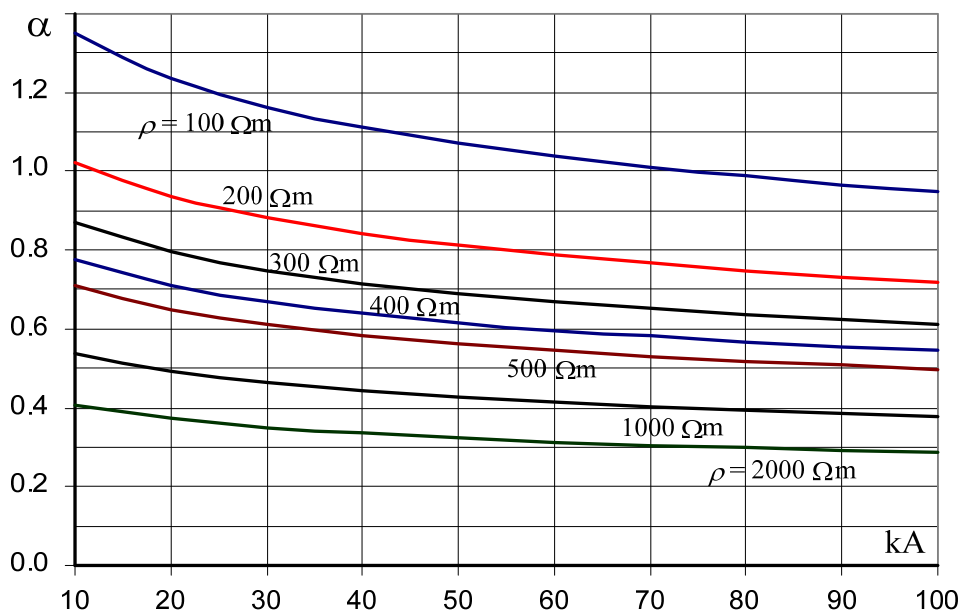
$$R_i = \alpha \cdot R_z.$$

Отпорноста на распростирање на заземјувачот за наизменична струја  $R_z$  се добива со мерење или пак се пресметува. За типските заземјувачи што се овде обработувани, тој е веќе пресметан и приложен во претходно прикажаните табели.

Доколку се работи за заземјувач на столб со поинаква геометрија од онаа опфатена со табелата 6.9, тогаш секогаш ќе постои можност тој со својот облик да се прилагоди кон некој од типовите означени со  $a \dots f$ , со цел добиените резултати за пресметка на импулсните коефициенти, дадени со изразите (6.9) . . . (6.14), да можат да се применат и во тој случај.

Така, на пример, преку споредба на конфигурациите на типските заземјувачи од сликите 6.2 – 6.17 со оние од табелата 6.9 се заклучува дека на заземјувачите од типот A2L и A4L најблиски по конфигурација се заземјувачите од типот  $e$  и  $c$  од табелата 6.9 – респективно. Со слично размислување се заклучува дека на заземјувачите тип В, В2L и В4L одговараат конфигурациите  $b, e$  и  $a$ .

За илустрација, во табелата 6.10 и на сликата 6.24 се прикажани некои вредности на импулсниот коефициент на заземјувач во форма на лента (тип  $d$ ) со должина  $l = 20$  m, пресметани според релацијата (6.12). Слично, во табелата 6.11 се прикажани некои вредности на импулсните коефициенти на заземјувачите тип A2L и В2L за должина на краците  $l = 10$  m.



Слика 6.24. Импулсни коефициенти за хоризонтален заземјувач со должина  $l = 20 \text{ m}$

Табела 6.10. Табеларен приказ на зависноста  $\alpha = f(I_M)$  на заземјувач во форма на лента со должина  $l = 20 \text{ m}$

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

Табела 6.11. Импулсни коефициенти  $\alpha$  на заземјувачите од типот A2×10 и B2×10

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

**Пример 6.4.** Се посматра 10 kV надземен вод со бетонски столбови и со потпорни изолатори тип PS 12 ( $U_{Podn} = 75 \text{ kV}$ ). Колкава ќе биде веројатноста за повратен прескок  $P_0$  при удар на гром во столбот за случајот кога столбовите се заземјени со заземјувачи од типот L2×10 (два крака од по 10 m), закопан во хомогено тло со специфична отпорност  $\rho = 100 \Omega\text{m}$ . Дали се во

тој случај задоволени одредбите од "Правилникот за градба на надземни електроенергетски водови со напон од 1 до 400 kV", во поглед на потенцијалот на столбот при траен земјоспој, дефинирани со релацијата (6.1) ако капацитивната струја на земјоспој изнесува  $I_Z = 20$  A.

**Решение:**

Од дијаграмите на сликите 6.20а и 6.20б отчитуваме дека за должина на краците  $l = 10$  m, заземјувачот од типот L2×10 ги има следните карактеристики:

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

Мах. потенцијална разлика на допир:  $E_{d,max} \% = 37\%$ .

Ако претпоставиме дека импулсниот коефициент на овој заземјувач е еднаков на еден ( $\alpha = 1$ ) тогаш ќе имаме:

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

$U_{\text{подн}} = 75 \text{ kV}$ ,

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

Притоа со  $I_M$  е означена најголемата амплитуда на струјата на громот за која директниот удар во столбот се уште нема да предизвика повратен прескок.

Сега е потребно да утврдиме колкава е веројатноста  $P_0$  амплитудата на струјата на громот да ја надмине вредноста  $I_M$ . Неа ќе ја добиеме со помош на табелата 6.2 од која можеме да ја процените веројатноста  $P = P(I \leq I_M)$ :

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

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

Од табелата 6.2, со примена на постапката на линеарна интерполација, добиваме:

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

за  $I_M = 10$  kA  $P(I \leq I_M) = 0,40$  (40%);

за  $I_M = 9,375$  kA  $P(I \leq I_M) = 0,36754$  (36,75%).

Според тоа веројатноста за повратен прескок  $P_0$  при удар на громот во столб ќе биде:

$P_0 = P(I > I_M) = 1 - 0,3675 = 0,6325$  (63,25%).

Значи практично 2/3 од ударите во столбовите од овој далекувод ќе предизвикуваат повратен пресекок а само 1/3 од нив нема да предизвикаат повратен прескок.

Условот (6.1) за најголемиот дозволен напон на столбот, според членот 80 од Правилникот, нема да биде задоволен бидејќи е:

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

Но сепак треба да се нагласи дека иако оваа одредба од Правилникот не е задоволена, сепак реална опасност од појава на превисок напон на допир не постои бидејќи е:

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



**Пример 6.5.** Да се пресмета колкава треба да биде должината на краците  $l = ?$  на заземјувачот тип L2×l од претходниот пример ако сакаме далекуводот да биде "отпорен" на громови со амплитуда на струјата до 15 kA, или, како што се вели, "заштитното ниво" на водот да биде  $I_0 = 15$  kA.

**Решение:**

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

$$R_Z = U_{\text{подн}} / I_0 = 75 / 15 = 5 \Omega . .$$

Од табелата 6.3 ја отчитуваме бараната вредност на должината  $l$  на краците:

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

**Табела 6.3. Зависност  $\mathcal{R}(l)$  кај типските зракасти заземјувачи**

$l$ (m)	тип L2	тип LT2	тип L3	тип LT3	тип L4
1	25.997	26.077	25.191	25.242	24.573
2	21.113	21.311	19.275	19.384	18.031
3	17.589	17.838	15.433	15.557	14.078
4	15.005	15.268	12.811	12.936	11.502
5	13.078	13.338	10.950	11.068	9.724
6	11.596	11.845	9.569	9.679	8.430
7	10.426	10.663	8.507	8.609	7.449
8	9.480	9.703	7.665	7.760	6.680
9	8.699	8.909	6.979	7.070	6.061
10	8.043	8.242	6.416	6.497	5.551
12	7.002	7.180	5.531	5.603	4.761
14	6.212	6.373	4.871	4.935	4.176
16	5.592	5.738	4.359	4.416	3.725
<b>→ 18</b>	<b>5.091</b>	<b>5.224</b>	<b>3.948</b>	<b>4.001</b>	<b>3.366</b>
20	4.677	4.800	3.613	3.661	3.074

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

Значи, ако заземјувачите на столбовите од далекуводот ги изведеме со должина на краците од по 18,5 m, тогаш далекуводот ќе биде отпорен на сите удари на громот со амплитуда до 15 kA. Во тој случај, како што се гледа од табелата 6.2, 62% од ударите нема да предизвикаат повратен прескок, а само 38% од нив ќе бидат опасни за далекуводот.



**Пример 6.6.** Да се реши случајот разгледуван во примерот 6.5 ако надземниот вод се изведе со потпорни изолатори од типот PS 24, наменети за 20 kV водови, чиј поднослив импулсен напон изнесува  $U_{\text{подн}} = 125$  kV.

**Решение:**

Во овој случај ќе имаме:

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

Значи заштитното ниво на водот изнесува  $I_0 = 15,63$  kA, бидејќи секое директно празнење во столбовите со амплитуда на струјата под оваа вредност нема да предизвика повратен прескок.

Веројатноста за повратен прескок  $P_0$  ќе се добие на следниот начин:

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

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

Во овој случај, значи, ќе имаме обратна ситуација: само 1/3 од ударите на громот во столбовите ќе предизвикаат повратен прескок.

Очигледно е дека оваа мерка за зголемување на доверливоста на работењето на надземниот вод е подеднакво ефикасна како мерката анализирана во претходниот пример. Разликата е во тоа што за зголемување на *должината на краците* (како во примерот 6.5) се потребни дополнителни градежни зафати (кои на веќе изведен далекувод понекогаш не се можни, особено кога станува збор за далекувод што минува низ населено место) и дополнителни инвестиции. Во случајов (со цена на заземјувањето од 10 €/m) тие дополнителни инвестиции се проценуваат некаде на **170 €/столб** или околу 1700 €/km.

За разлика од зафатот во заземјувањето, промената на изолацијата е многу поедноставен и поефтин зафат, особено ако примената на 20 kV изолатори е предвидена уште при самата изведба на водот. Разликата во цена помеѓу потпорните изолатори за 10 и 20 kV напон е мала и изнесува 4 – 5 €/изолатор, така што просечната цена на целиот зафат во овој случај би изнесувал не повеќе од  $3 \times 5 = 15$  €/столб или приближно 150 €/km.



**Пример 6.7.** Столбовите од еден 20 kV надземен вод е предвидено да се заземјуваат со прстенести заземјувачи во форма на круг, изведени од поцинкувана челечна лента FeZn 30×4 ( $d = 22$  mm), закопана на длабочина  $h = 0,7$  m. Столбовите минуваат низ терени со различни специфични отпорности на тлото  $\rho$ : 50, 100, 150, 200 и 300 Ωm. За секој од нив да се пресмета потребниот пречник на кругот  $D$  така што отпорноста на распространяње на заземјувачот, во согласност со Препораката ТП 7, да изнесува  $R_Z = 15$  Ω.

**Решение:**

Како што е познато, за пресметување на отпорноста  $R_Z$  на предвидениот заземјувач постои следната емпириска формула:

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

Да го пресметаме најнапред потребниот пречник на кругот  $D$  за случајот кога е  $\rho = 100$  Ωm, а потоа истата постапка ќе ја повториме и за останатите случаи на специфичната отпорност на тлото  $\rho$ .

Како што може да се види од обликот на формулата (1) пресметувањето на потребниот пречник  $D$  со помош на оваа формула води кон решавање на една трансцедентна равенка која не го дава директно бараното решение. Затоа проблемот ќе го решиме итеративно, со помош на следната рекурентна формула:

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

која што произлегува од формулата (1) и во која со  $D_k$  е означена вредноста на бараната променлива во  $k$ -тата итерација.

Секоја итеративна постапка бара добро почетно решение кое треба да биде доволно блиску до вистинското за да може итеративниот процес брзо и сигурно да заврши. Нека претпоставиме дека тоа почетно решение, коешто ќе го означиме со  $D_0$ , изнесува:

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

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

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

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

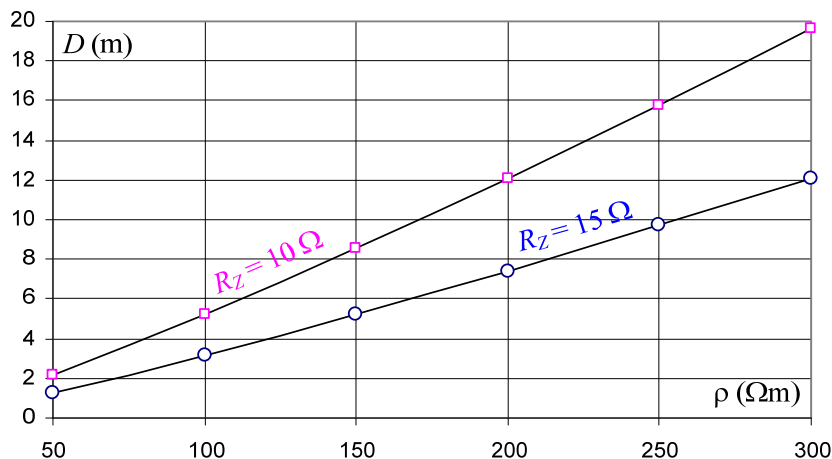
После само неколку итерации се добива бараното решение (заокружено на втора деци-мала):

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

На сличен начин се добиваат потребните димензии на пречникот  $D$  на заземјувачот и за останатите вредности на специфичната отпорност на тлото. Тие се прикажани во табелата 1 и на дијаграмот од сликата 1. На истата табела и слика е прикажан и случајот кога се бара да биде  $R_z = 10 \Omega$ .

**Табела 1. Зависност  $D(\rho)$  кај хоризонтален заземјувач во форма на круг со пречник  $D$**

$\rho$ ( $\Omega\text{m}$ )	50	100	150	200	300
$D$ (m) за $R_z=15 \Omega$	1,25	3,11	5,19	7,40	12,09
$D$ (m) за $R_z=10 \Omega$	2,15	5,19	8,54	12,09	15,79



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



**Пример 6.8.** Заземјувачите од првите 10 столбови на еден 35 kV далекувод, коишто му припаѓаат на штитениот приод од една трафостаница 110/35/10 kV/kV/kV треба да се заземјат со зракасти заземјувачи со мала импулсна отпорност. За секој од заземјувачите на столбовите е предвидено да се употреби поцинкувана челична лента FeZn 30×4 со вкупна должина  $L_\Sigma = 60 \text{ m}$ . Специфичната отпорност на тлото изнесува  $\rho = 100 \Omega\text{m}$ . Струјниот импулс на громот има облик 1,2/50  $\mu\text{s}$  ( $T_c = 1,2 \mu\text{s}$ ). Притоа е можно да се усвои една од следните 4 конфигурации на симетрични зракасти заземјувачи (видете ја задачата 6.1):

- 1) 2L
- 2) 3L
- 3) 4L
- 4) 6L.



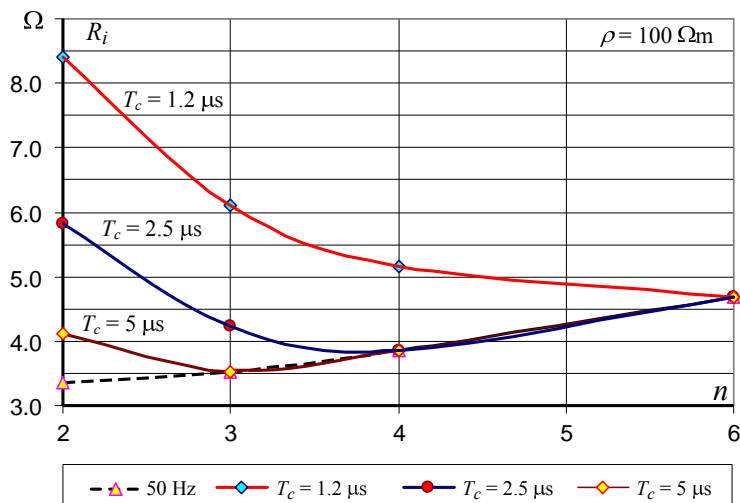
- а) да се утврди која од споменатите 4 конфигурации ќе има најмала импулсна отпорност.  
 б) задачата да се повтори и за случајот кога челото на струјниот имулс има должина  $T_c = 2,5 \mu\text{s}$  и  $T_c = 5 \mu\text{s}$ .

**Решение:**

На начин подобен на оној применет во примерот 6.2, со помош на релацијата (1) и табелата 1, изложени во примерот 6.1, се вршат пресметки на конвенционалната отпорност  $R_Z$ , импулсната отпорност  $R_i$  и ударниот коефициент  $\alpha$ . На тој начин се добиваат бараните резултати за случајот под а), кога специфичната отпорност на тлото изнесува  $\rho = 100 \Omega\text{m}$  и  $T_c = 1,2 \mu\text{s}$ . Резултатите се прикажани во табелата 1. Истите резултати се графички прикажани и на дијаграмот од сликата 1.

**Табела 1. Зависност  $R_Z(n)$  и  $R_i(n)$  на зракаст хоризонтален заземјувач со сумарна должина  $L_\Sigma = 60 \text{ m}$  и со различен број на краците  $n$ .  
 $T_c = 1,2 \mu\text{s}$**

$n$	2	3	4	6
$L_\Sigma$ (m)	2×30	3×20	4×15	6×10
$\eta$	0.870	0.768	0.662	0.498
$R_Z$ ( $\Omega$ )	3.352	3.514	3.848	4.681
$R_i$ ( $\Omega$ )	8.399	6.099	5.157	4.681
$l_a$ (m)	11.5	11.4	11.3	11.1



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

Од резултатите прикажани во табелата 1 и сликата 1 се гледа дека ударниот ефект што се должи на присуството на индуктивноста на краците од заземјувачот, за стрмните импулси со време на челото  $T_c = 1,2 \mu\text{s}$ , се силно изразени. Во таквите случаи најповолна варијанта е свездата со  $n = 6$  краци ( $R_i = 4,681 \Omega$ ) бидејќи таа има најмала ударна отпорност. Тоа се должи на фактот што за ваквите струјни импулси активната должина на краците изнесува околу 11,3 m додека должината на краците кај шестокраката свезда е 10 m.

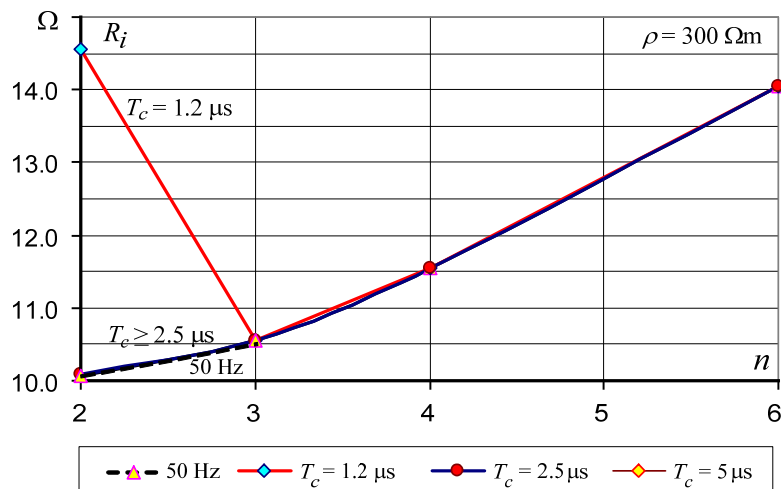
На сликата 1, покрај случајот кога е  $T_c = 1,2 \mu\text{s}$ , се прикажани и резултатите за зависноста  $R_i(n)$  за струјни импулси со поголеми времиња на челото и тоа за 2,5 и за 5  $\mu\text{s}$ .

Од оваа слика гледаме дека ударните ефекти на простирање кај краците се сега, заради помалата стрмнина на струјата, помали, така што оптималното решение се добива за  $n = 4$ , кога се работи за чело  $T_c = 2,5$  ( $R_i = 3,848 \Omega$ ) односно  $n = 3$ , за струјните импулси со време на челото  $T_c = 5 \mu s$  ( $R_i = 3,514 \Omega$ ).

Од овој пример може да се заклучи дека кога се работи за импулсни отпорности на распростирање на заземјувачите, не постои еднозначно оптимално решение. За пострмните импулси подобри се решенијата со помали должини на краците и со поголем број краци. Обратно, за поблагите импулси подобри се решенијата со помал број краци бидејќи кај нив импулсната отпорност се доближува со својата големина до конвенционалната отпорност на распростирање  $R_Z$  а во исто време тие имаат повисок коефициент на полезно дејство  $\eta$ .

На крајот да кажеме уште неколку збора за влијанието на големината на специфичната отпорност на тлото врз ударните ефекти кај заземјувачите.

Како што веќе беше покажано во примерот 6.3, индуктивноста на заземјувачите доаѓа до израз кај стрмните импулси и кај почвите со ниска специфична отпорност. Колку отпорноста  $\rho$  на почвата е поголема, толку ударните ефекти кај заземјувачот се намалуваат и стануваат помалку влијателни. Така, на пример, ако претходните анализи ги спроведеме за случајот кога е  $\rho = 300 \Omega m$ , ќе ги добиеме резултатите прикажани на сликата 2. За почви со  $\rho \geq 500 \Omega m$  ударните ефекти што се должат на присуството на индуктивноста на заземјувачите скоро целосно изостануваат и можат слободно да се занемарат. Во тие случаи доминантни се обратните ефекти предизвикани од искрењето и електричното празнење во почвата и кои доведуваат до намалување на импулсната отпорност на заземјувачот.

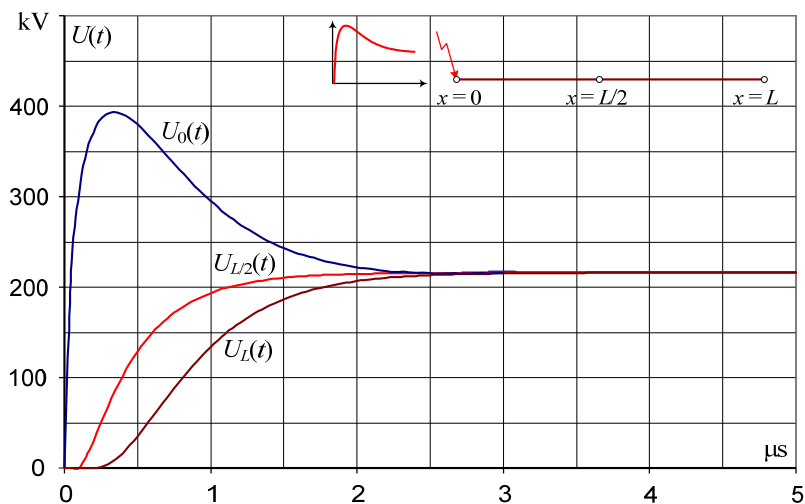


Слика 2. Зависност  $R_i = f(n)$  кај зракастите заземјувачи кога е  $\rho = 300 \Omega m$

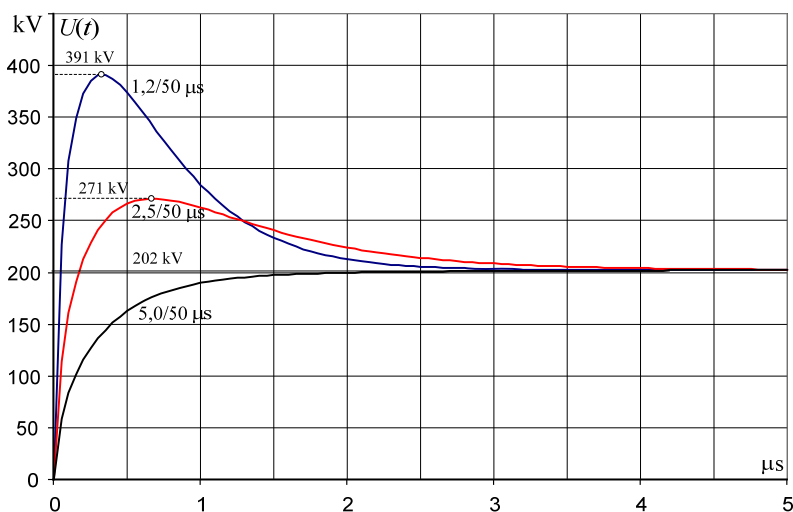


**Пример 6.9.** Со помош на програмата "ImpulsenOtprog.xls" да се изврши пресметка на временскиот тек на напонот на заземјувачот од примерот 6.2 (FeZn 30×4,  $l = 20$  m,  $h = 0,7$  m;  $\rho = 100 \Omega\text{m}$ ) за случај кога импулсот на струјата на громот има темена вредност  $I_M = 25$  kA а неговиот облик има параметри: а) 1,2/50; 2,5/50 и 5,0/50  $\mu\text{s}$ . Колкави се вредностите на импулсниот коефициент  $\alpha$  добиен на тој начин.

**Решение:**



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



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

Со помош на програмата е вршена симулција на преодниот процес што се јавува при простирање на струјниот импулс на громот по должината на долг лентест заземјувач. На тој начин е добиен временскиот тек на напонот  $U_0(t) = U_Z(t)$  на самиот почеток од лентата ( $x=0$ ) како и напоните  $U_{L/2}(t)$  и  $U_L(t)$  на нејзината средина ( $x=L/2$ ) и нејзиниот крај ( $x=L$ ). Резултатите од пресметките, за  $T_c=1,2 \mu\text{s}$ , се графички прикажани на сликата 1.

Резултатите од симулациите со помош на кои што се пресметани временските текови на напонот на заземјувачот  $U_Z(t)$  за сите 3 случаи, наведени под а) б) и в), се прикажани на сл. 2.

Импулсната отпорност на заземјувачот  $R_i$  се дефинира како однос помеѓу темената вредност на напонот  $U_M$  и темената вредност на струјата  $I_M$ , т.е.  $R_i = U_M / I_M$ . Импулсниот коефициент  $\alpha$ , пак, се дефинира како однос помеѓу импулсната отпорност  $R_i$  и конвенционалната отпорност на распростирање на заземјувачот за фреквенција 50 Hz.  $R_Z$ , која за дадениот заземјувач изнесува  $R_Z = 8,1 \Omega$  (видете го примерот 6.2). На тој начин се пресметуваат импулсните отпорности  $R_i$  и коефициентите  $\alpha_i$  за секој од трите облици на струјниот импулс:

а) облик на струјниот импулс 1,2/50  $\mu$ s:

$$R_{i(1.2/50)} = \frac{391}{25} = 15,64 \Omega; \quad \alpha_{1.2/50} = \frac{15,64}{8,1} = 1,93;$$

б) облик на струјниот импулс 2,5/50  $\mu$ s:

$$R_{i(2.5/50)} = \frac{271}{25} = 10,84 \Omega; \quad \alpha_{1.2/50} = \frac{10,84}{8,1} = 1,34;$$

в) облик на струјниот импулс 5,0/50  $\mu$ s:

$$R_{i(5.0/50)} = \frac{202}{25} = 8,1 \Omega; \quad \alpha_{1.2/50} = \frac{8,1}{8,1} = 1,0.$$



**Задача бр. 6.1.** Столбовите од 20 kV надземен вод, анализиран во примерот 6.5, е предвидено да се заземјуваат со заземјувачи во форма на четирикрака ѕвезда, изведени од поцинкувана челична лента FeZn 30×4 ( $d = 22$  mm), закопана на длабочина  $h = 0,7$  m. Водот минува низ терени со различни специфични отпорности на плото:  $\rho = 100, 300$  и  $500 \Omega$ m.

За секој од овие три случаи да се пресмета потребната должина  $l=?$  на краците од ѕвездата така што отпорноста на распростирање на заземјувачот на столбот, во согласност со Препораката ТП 7, да изнесува  $R_Z = 15 \Omega$ .


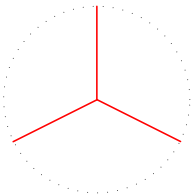
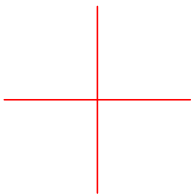
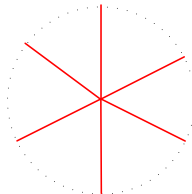
Задачата да се реши на два начина:

- ✓ со помош на табелата 6.3, применувајќи ја постапката на линеарна интерполација;
- ✓ аналитички, со помош на следната емпириска формула:

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

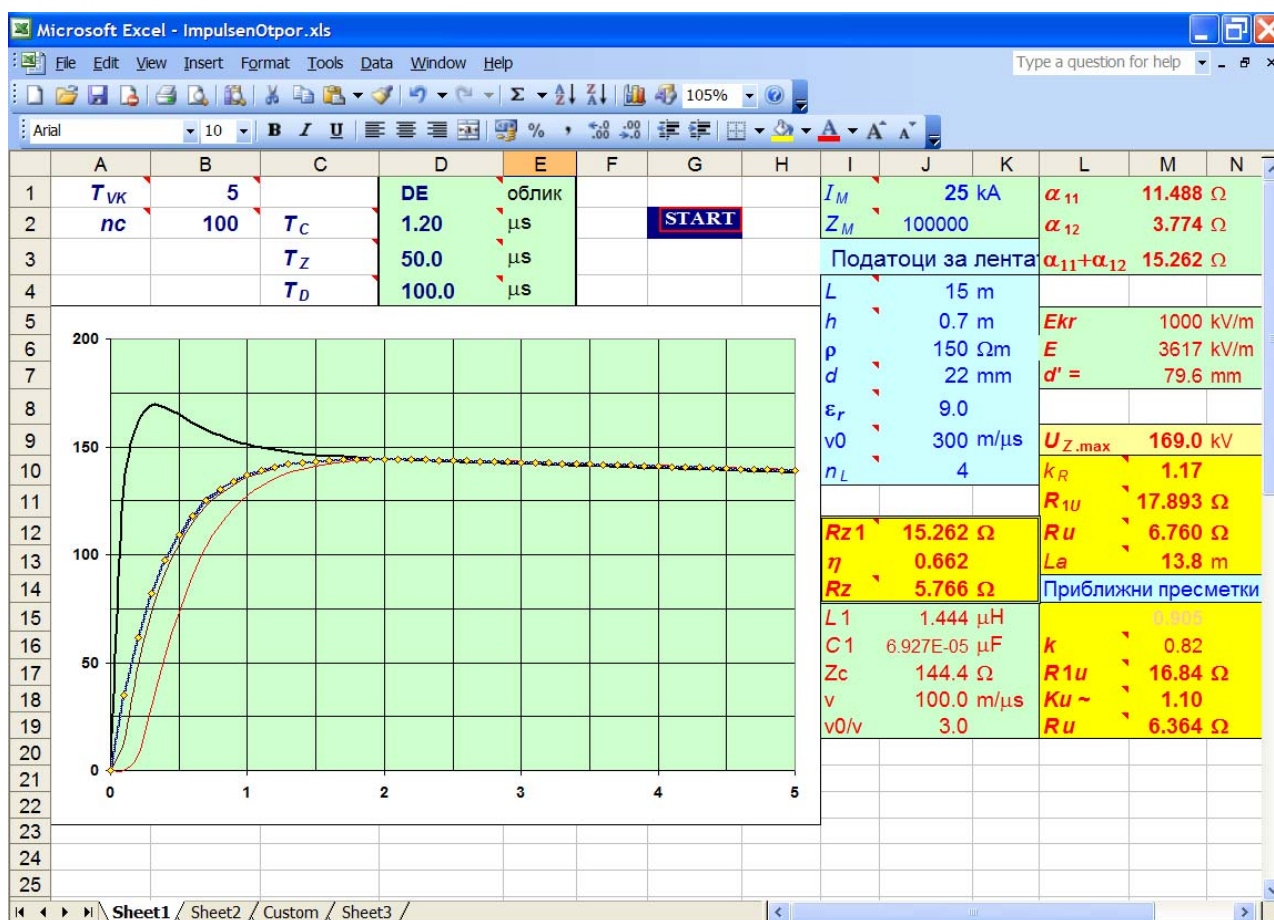
Емпирииската формула (1) е општа и важи за зракастите заземјувачи со 2, 3, 4 и 6 краци, во согласност со табелата 1. Во неа со  $A_k$  е означена емпирииската константа чија вредност зависи од бројот на краците  $k$ , додека со  $L_\Sigma$  е означена сумарната должина на краците од ѕвездата, т.е.  $L_\Sigma = k \cdot l$ . Во случајот на четирикрака ѕвезда ( $k=4$ ) се добива  $L_\Sigma = 4 \cdot l$ .

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

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

**Напомена.** Резултатите од табелата 6.3 се однесуваат на случајот кога во пресметките е земено предвид и присуството на темелот на столбот, поради што не треба да се очекува целосно совпаѓање на резултатите добиени на двата различни начина.

## УПАТСТВО за користење на програмата "ImpulsenOtpor.xls"



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

Програмата "ImpulsenOtpor.xls" служи за пресметување на импулсната отпорност на зракасти заземјувачи од типот "L", "L2", "LT2", "L3", "LT3", "L4" и "L6" (описани во точката 6.2) формирани од долги хоризонтални ленти кај кои се јавуваат ефектите на простирање на струјните и напонските бранови.

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

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

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

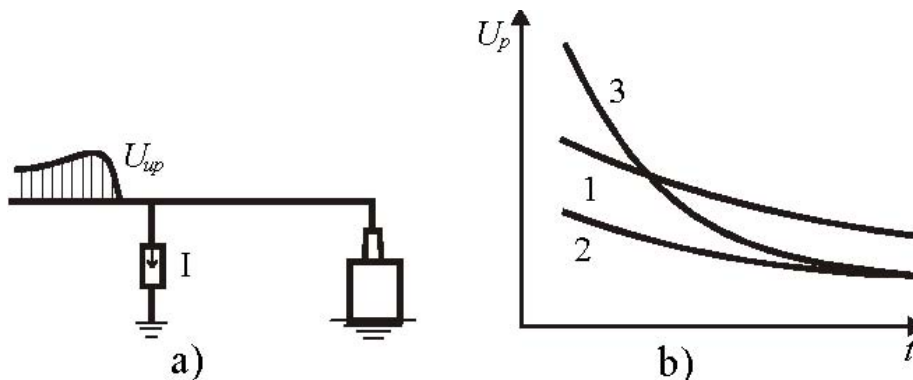
Како резултат на пресметките се добиваат следните податоци:

## 7. ОДВОДНИЦИ НА ПРЕНАПОНИ

За заштита на опремата во електроенергетските системи од атмосферските пренапони во денешно време се применуваат специјални уреди. Тие се активираат кога амплитудата на пренапонот во точката во која што се приклучени ќе надмине некоја гранична вредност. Во таквите средства се вбројуваат *искриштата* и *одводниците на пренапони*. Принципот на заштитата што се остварува со овие заштитни уреди е прикажан на сликата 7.1.

На сликата 7.1а е прикажан случај кога упаден бран наидува на искриште I што треба да штити некаков апарат со определена изолациона конструкција. За да се избегне прескок на изолационата конструкција, значи, паралелно со неа се поставува заштитен уред, во конкретниот случај искриште I. На сликата 7.1б се прикажани *волт-секундните карактеристики* на изолацијата (крива 1) и искриштето (крива 2 односно крива 3). Волт-секундната карактеристика на некој уред ја дава зависноста на прескочниот/пробојниот напон од времето. Притоа мора волт-секундната карактеристика на изолацијата (крива 1 на сликата 7.1б) во секој момент да биде под волт-секундната карактеристика на искриштето за да имаме остварена сигурна заштита на изолационата конструкција.

Во моментот кога вредноста на напонот во точката каде што е приклучен заштитниот уред стане поголем од напонот на реагирање на искриштето, ќе дојде до негово реагирање после кое доаѓа до нагло паѓање на напонот во таа точка (а се разбира и во соседството) поради тоа што со реагирањето на искриштето на патот на пренапонскиот бран се вклучува некаков шант со мала активна отпорност кој ќе го одведе бранот во земјата.



Слика 7.1. Принцип на заштита на уредите во ЕЕС од атмосферски пренапони (а) и волт-секундни карактеристики на разните видови искришта (б)

Доколку пренапонската заштита се остварува со искриште тогаш по завршувањето на импулсниот преоден процес на местото на искриштето ќе се воспостави струја на куса врска под дејство на погонскиот напон 50 Hz а тоа би довело до реагирање на релејната заштита и исклучување на штитениот уред. Струјата на куса врска (доземен спој) протерана низ искриштето под дејство на работниот напон 50 Hz што ќе се воспостави по завршувањето на преодниот процес се нарекува *пропратна или придружна струја*. Сосема е јасно дека за да се елиминира појавата на кусата врска и исклучувањето на штитениот уред згодено би било пропратната струја воопшто да не се појави или, пак, таа на некој начин да се изгаси доволно брзо. Постојат уреди кои со своето искриште обезбедуваат не само заштита на изолацијата од пренапони туку и гаснење на лакот во искриштето создаден од пропратната струја за време кое е покусо од времето на дејствување на релејната заштита. Таквите уреди се нарекуваат заштитни одводници. Тие се разликуват од обичните искришта по тоа што во серија со своето искриште имаат и нелинеарен отпорник со изразена нелинеарност (вентилност) поради што тие се нарекуваат уште и "вентилни одводници" на пренапони.

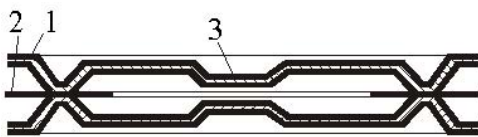


Одводниците на пренапони се заштитни уреди кои со своето дејство ги ограничуваат атмосферските пренапони но понекогаш тие вршат ограничување и на некои водови кому- тациони пренапони. Во денешно време се користат два типа на одводници на пренапони:

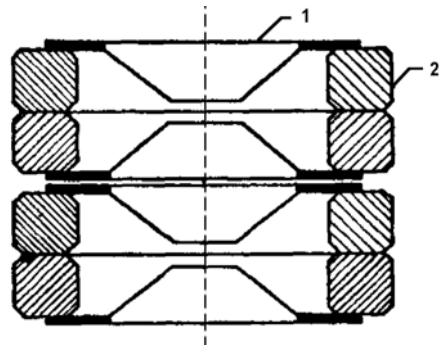
- класични силициум-карбидни (SiC) одводници;
- цинк-оксидни (ZnO) дводници на пренапони.

Цинк-оксидните одводници на пренапони имаат таква вентилност на својата волт- амперна карактеристика што им не е воопшто потребно искриште. Затоа тие се изведуваат без искришта и цело време работат приклучени на погонскиот напон. Затоа за нив претходно изложената логика во врска со придружната струја и нејзиното гасење не важи.

## 7.1. SiC – ОДВОДНИЦИ НА ПРЕНАПОНИ



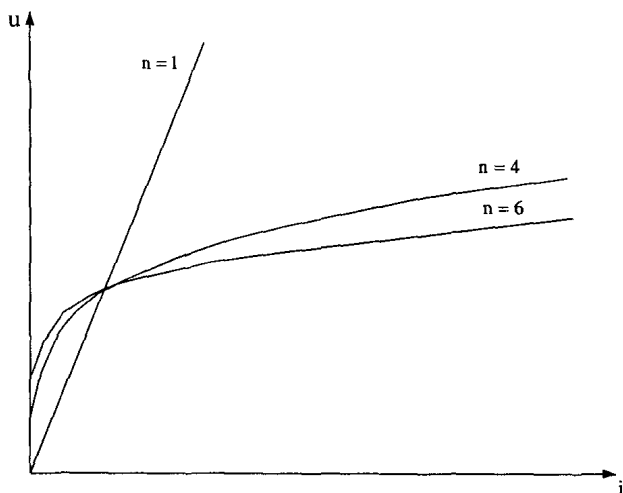
Искриште:  
1) електроди; 2) изолациона подлошка;  
3) место за прескок.



1) искриште; 2) порцелански прстен

Слика 7.2. Основни елементи на еден класичен одводник на пренапони и изведби.

SiC – одводници се изведуваат во форма на низа од поголем број SiC – плочки (погачи) и искришта (слика 7.2). Со бројот на сериски поврзаните искришта и со зјајот помеѓу секое од нив се определува напонот на реагирање на одводникот. Погачите од силициум-карбид, пак, имаат нелинеарен отпор така што помеѓу напонот  $u$  на краевите од секоја погача и струјата  $i$  која тече низ неа постои врска од обликот 7.1



Слика 7.3. Волт-амперна (V-A) карактеристика на класичен SiC-одводник на пренапони

$$u = C \cdot i^\alpha = C \cdot i^{\frac{1}{n}} \quad (7.1)$$

каде што  $C$ ,  $\alpha$  и  $n$  се константи коишто зависат од конструкцијата и употребениот материјал.

Вредноста на константата  $\alpha$  обично се движи во интервалот од 0,16 до 0,50, односно константата  $n$  се движи во границите од 2 до 6. Константата  $C$ , пак, зависи од димензиите и бројот на SiC-погачи.

На сл. 7.3 е прикажана зависноста  $u = f(i)$  за разни вредности на константата  $n$ . Од неа се гледа дека за мали вредности на  $\alpha$ , односно за големи вредности на  $n$ , напонот на SiC-плочката  $u$  незначително зависи од струјата на спроведување  $i$ .



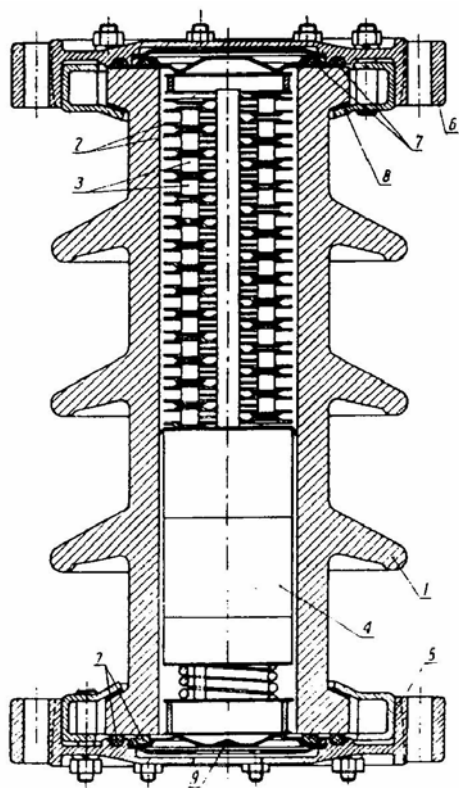
Ова својство на силициум-карбидот е од исклучително значење за одводникот на пренапон бидејќи тој практично успева да го одржува напонот на своите краевина константа вредност независно од интензитетот на струјата на одведување односно струјата на атмосферското празнење.

Со нелинеарноста на отпорноста на SiC-плочките се постигнуваат два важни ефекта. При големи струи на одведување се постигнува мала внатрешна отпорност на одводникот и ниски напони во точката на приклучување на одводникот. При мали струи на одведување, пак, обратно, одводникот се спротивставува на течењето на струјата со многу поголем внатрешен отпор а тоа доведува до гасење на струјата во искриштата на одводникот. Тоа е од особена важност за самиот одводник бидејќи доколку таквата, како што се нарекува "пропратна" струја не се угаси, тогаш би дошло до термичко оштетување односно разорување на одводникот на пренапони.

На сликата 7.3 е прикажан изгледот на еден SiC-одводник на пренапони. Одделните елементи во неговата конструкција го имаат следното значење:

- 1) куќиште од порцелан, херметички затворено;
- 2) серија (низа) од искришта;
- 3) регулациони отпорници или изолациони подлошки;
- 4) столб од нелинеарни отпорници (SiC-погачи);
- 5) и 6) монтажни елементи;
- 7) и 8) арматура за прицврстување;
- 9) отвор за полнење со гас.

#### Карактеристики на одводниците



Слика 7.4. Конструкција на еден SiC-одводник на пренапони

Основни карактеристики на одводниците на пренапони се:

*Номинален напон на одводникот* – највисок напон со индустриска фреквенција (50 Hz) при кој одводникот успешно може да ја исгаси пропратната струја;

*Номинална фреквенција* – фреквенција на погонскиот напон за која што е конструиран (предвиден) одводникот на пренапони;

*Номинална струја на одведување* – темена вредност на ударната струја со облик 8/20  $\mu$ s / $\mu$ s која што одводникот може да ја поднесе.

Стандардни вредности на номиналната струја на одведување за одводниците се следните 1500 A, 2500 A, 5000 A и 10000 A. Според можностите за одведување, одводниците на пренапони се делат на: одводници за "нормални услови на работа" и на одводници за "тешки услови на работа" (heavy duty valve arresters). Последниве се предвидени да реагираат и на склопните (комутационите) пренапони;

*Долготрајна ударна подносилива струја* – струја која што одводникот може да ја поднесе при појава на склопни пренапони, при вклучување на надземен вод со земјоспој или при неговото вклучување во празен од, при вклучување на кондензаторски батерии и сл. Струјните бранови кај ваквите преодни процеси имаат приближно правоаголен облик и обично траат од 500 до 3200  $\mu\text{s}$ . Темената вредност  $I_m$  и траењето  $T$  на овие струјни бранови што се генерираат при споменатите манипулации со водовите изнесува:

$$I_m = \frac{U_{\max} - U_0}{Z_c}; \quad T = \frac{2 \cdot l_V}{v} \quad (7.2)$$

каде што  $U_{\max}$  е максималниот напон што се воспоставил на водот пред реагирањето на одводникот,  $U_0$  е напонот на одводникот што се воспоставува при одведување на струјата  $I_m$  (кој што е близок до "преостанатиот напон" на одводникот),  $v$  е брзината на простирање на пренапонските бранови ( $v = 300 \text{ m}/\mu\text{s}$  за надземните водови и  $v \approx 150 \text{ m}/\mu\text{s}$  за кабелските водови),  $Z_c$  е бранова импеданција на водот и  $l_V$  е неговата должина;

*Преостанат напон на одводникот  $U_{Pr}$*  – пад на напон на одводникот кога низ него тече неговата номинална струја;

*Напон на реагирање при фреквенција 50 Hz* – најмалата ефективна вредност на напонот при која доаѓа до реагирање на одводникот на пренапони. Тој напон треба да биде барем за 50% повисок од номиналниот напон на одводникот;

*Стандарден ударен напон на реагирање на одводникот (100% ударен напон на реагирање)* – минимална темена вредност на импулсниот бран 1,2/50 којшто секогаш доведува до реагирање на одводникот;

*Напон на реагирање на одводникот на челото на бранот* – напон на реагирање на одводникот при простирање на бран со линеарно растечко чело со стрмнини коишто се поголеми од стрмнината на стандардниот бран 1,2/50;

*Волт-секундна карактеристика (V-s) на одводникот* – зависност на напонот на реагирање од времето на реагирање;

*Пропратна струја на одводникот* – струја којашто тече низ одводникот после неговото реагирање. Оваа струја се воспоставува по изминувањето на пренапонскиот бран и тече под дејство на работниот напон 50 Hz;

*Заштитно ниво на одводникот  $U_Z$*  – вредност која што е најголема од следните три напони:

- напонот на реагирање на одводникот на челото на бранот,
- стандардниот ударен напон на реагирање на одводникот и
- преостанатиот напон на одводникот  $U_{Pr}$ .

*Коефициент на заштита* – однос помежу подносиливиот ударен напон на изолацијата  $U_{Podn}$  и заштитното ниво на одводникот  $U_Z$ :

$$k_z = \frac{U_{Podn}}{U_Z} \quad (7.3)$$

**Табела 7.1. Коефициенти на заштита за мрежи со разни номинални напони**

Номинален напон, kV	6	10	20	35	110	220	380
Највисок раб. напон, kV	7,2	12	24	38	123	245	420
Коефициент $k_z$	2,0	1,7	1,4	1,3	1,3	1,3	1,2

Вообичаените вредности на коефициентот на заштита за мрежите со различни номинални напони се дадени во следната табела. Се забележува дека кај мрежите за висок ( $U_n = 110 \text{ kV}$  и  $220 \text{ kV}$ ) и највисок номинален напон ( $U_n = 380 \text{ kV}$ ) имаат пониско изолационо ниво што е и разбирливо со оглед на фактот дека цената на изолацијата кај тие мрежи е прилично висока.

Во табелата 7.2 се прикажани техничките карактеристики на класичните SiC-одводници од типот VOP-6e со разни номинални напони кои што се произведуваа во бившата СФРЈ и кои сè уште се во значителна мера присутни во нашите ВН и СН мрежи. Во првата колона од табелата е наведен номиналниот напон на одводникот. Со  $U_{reag}$  48-62 Hz е означен напонот на реагирање на наизменичен напон, додека со  $U_{reag}$  1,2/50 е означен напонот на реагирање на импулсен напон со стандарден облик и на крајот, со  $U_{Pr}$  е означен преостанатиот напон (kV) што се има на одводникот при разни струи на одведување. Останатите карактеристики на овие одводници се следните: номинална струја на одведување со стандарден облик 8/20  $\mu\text{s}/\mu\text{s} - 10 \text{ kA}$ ; струја на одведување во форма на правоаголен бран со должина 2000  $\mu\text{s} - 150 \text{ A}$ ; гранична струја на одведување со облик 4/10  $\mu\text{s}/\mu\text{s} - 100 \text{ kA}$ .

**Табела 7.2. Технички карактеристики на одводниците тип VOP-6e**

Ном. напон kV	$U_{reag}$ 48 – 62 Hz		$U_{reag}$ , 1,2/50 ( $\mu\text{s}/\mu\text{s}$ )		$U_{Pr}$ , при струи на одведување		
	min kV	max kV	100% kV	чело kV	5 kA kV	10kA kV	20kA kV
45	83	100	122	147	119	133	153
81	149	180	220	264	215	238	276
105	193	230	264	342	278	309	357
117	215	260	318	481	310	344	400
126	232	280	342	411	344	370	430

## 7.2. ЦИНК–ОКСИДНИ (ZNO) ОДВОДНИЦИ НА ПРЕНАПОНИ

Од средината на седумдесетите години во минатиот век е започната употребата на цинк-оксидните (ZnO) одводници на пренапони, за прв пат во Шведка, а подоцна и во другите европски земји, па и кај нас, особено во последните десетина години. Причината за нивната широка употреба лежи во фактот што тие имаат многу поедноставна конструкција идејќи се изведуваат без искриште. Тие се, значи, цело време приклучени на напон и на тој начин реагираат на сите видови пренапони. Способноста за апсорпција на енергија на ZnO блокови е поголема од истата кај одводниците со SiC отпорници. Отсуството на искриште овозможува паралелно да се поставуваат и повеќе одводници, со што може да се прошири нивната примена и во потешки услови на работа (заштита од комутациони пренапони на долги водови, кондензаторски батерии, пространи кабелски мрежи и сл.).

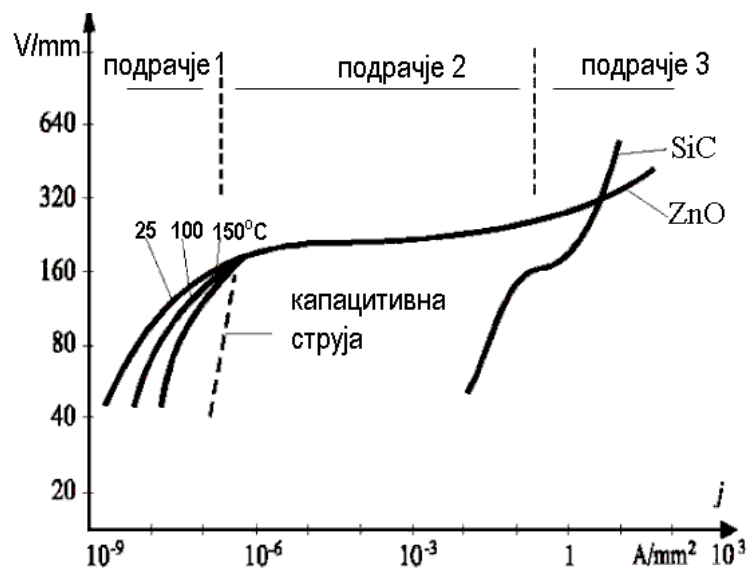
V-A карактеристика на отпорниците изработени врз база на ZnO го има истиот облик (7.1) како и кај класичните одводници на база на SiC, но овде таа е значително понелинеарна од соодветната карактеристика кај отпорниците од SiC. Тоа овозможува да се реализира одводник и без искриште и со тоа да се избегнат слабостите кои ги носи со себе неговото присуство во одводникот, како и дополнителните трошоци за неговата изведба. Притоа во нормален режим на работа (50 Hz) низ одводникот тече многу мала струја со интензитет од 500 – 1000  $\mu\text{A}$  која има капацитивен карактер. Таа како таква термички воопшто не ги напрегнува отпорниците во одводникот ниту пак создава некои значителни загуби на

моќност и енергија. Сепак во мрежите во кои се јавуваат привремени пренапони релативно високи вредности се применуваат и ZnO одводници со искришта и во тој случај не е можно во целост да се искористат сите предности на овој вид одводници на пренапони.

Сите овие очигледни предности на ZnO одводници овозможиле во последно време нагло да порасне интересот за нивната примена.

### 7.2.1. Споредба на функционирањето на ZnO и SiC одводници

Цинк-оксидните (метал-оксидните) одводници на пренапони се состојат од блокови коишто се изготвени во најголем дел (до 99%) од цинков оксид (ZnO). Во блоковите се додаваат и други метални оксиди и потоа таквата смеса по пат на синтерување се обликува во вид на плочи ("погачи") со потребните димензии. V-A карактеристика на така изготвените блокови има извонредно нелинеарни особини.



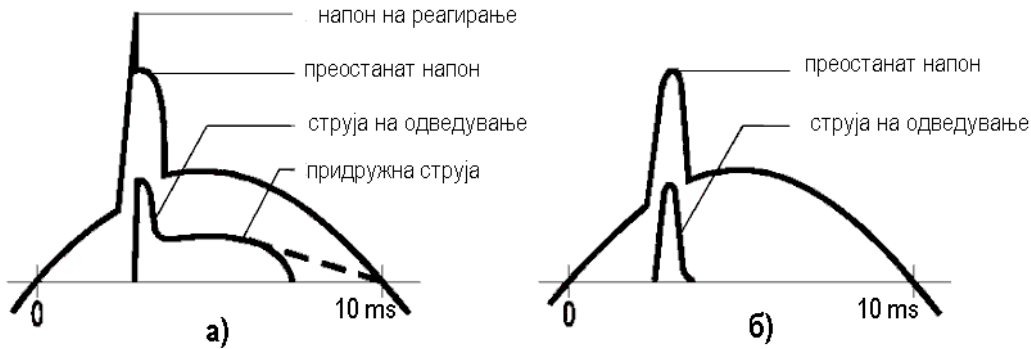
Сл. 7.5. V-A карактеристика на еден ZnO елемент и споредба со соодветната карактеристика на елемент од SiC

На сл. 7.5 е прикажана V-A карактеристика на еден ZnO елемент. За споредба, на истата таа слика е прикажана и V-A карактеристика на блокот од SiC. Коефициентот на нелинеарност кај ZnO елемент е многу мал и во доменот на малите струи ја достигнува вредноста  $\alpha = 0,05$  додека во доменот на големи струи од редот на големина десетина или повеќе килоампери, тој достигнува вредности и до 0,02. За разлика од ZnO одводници, кај класичните одводници, во исти услови, без искришта, би течела струја 50 Hz од неколку стотици ампери, што би довело до разорување на отпорничките елементи од SiC.

Отпорниците на ZnO одводници се врзуваат сериски а нивниот број зависи од трајниот работен напон на којшто е изложен одводникот на пренапони. Се изработуваат блокови со различни пречници, а благодарейќи на тоа што овие одводници немаат сериско искриште, паралелно врзувајќи два или повеќе столбови, може да се формира одводник со бараниот капацитет за одведување на потребното струјно оптоварување. За разлика од нив, кај класичните одводници, одводникот кој прв ќе реагира ја презема на себе целата енергија на празнење што со себе ја носи пренапонскиот бран.

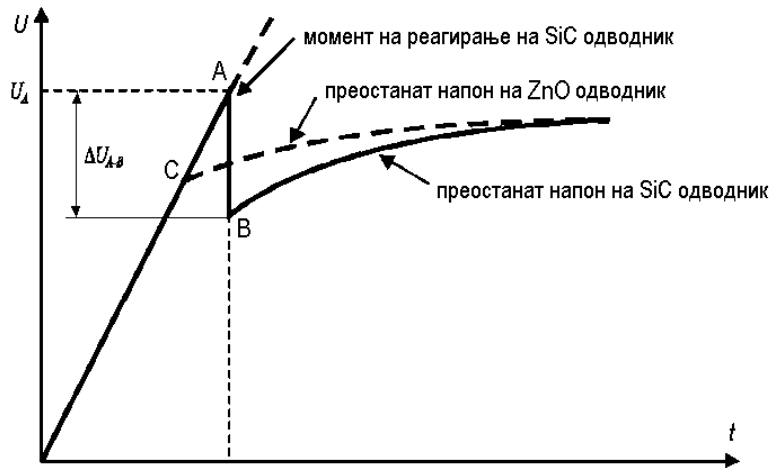
Основната разлика во функционирањето на одводниците од SiC и ZnO се гледа од сл. 7.6. SiC одводник започнува да дејствува кога напонот на неговите краеве ќе ја надмине вредноста на неговиот напон на реагирање. Низ одводникот тогаш тече струјата на одведување со која е дефиниран неговиот преостанат напон, а потоа, по завршувањето на импулс-

ниот преоден процес, низ него тече придружната струја 50 Hz предизвикана од погонскиот напон. Кај стандардните одводници придружната струја тече сè до првото минување на напонот низ нула, додека кај конструкциите на искришта со магнетско гаснење на лакот тоа настанува дури и нешто порано. Кај ZnO одводници, напротив, одведувањето на пренапонот започнува веднаш со појавата на пренапонот и трае с# додека трае самиот пренапон.



Сл. 7.6. Принцип на функционирање на одводниците на пренапони.  
а) класичен SiC одводник; б) ZnO одводник

Споредбата на класичните со ZnO одводници не би била потполна ако не се согледа битната разлика на процесот на создавање пренапони, кој е резултат на постоење на искриште кај класичните одводници, како што се гледа од сл. 7.7. Сломот на напонот при реагирање на искриштето предизвикува осцилаторен процес кој дополнително ги зголемува пренапоните. За разлика од тоа, MO одводник непрекинато е приклучен на мрежата и на тој начин, кога напонот на одводникот ќе премине определена вредност, тој ја одведува импулсната струја одржувајќи притоа напон еднаков на преостанатиот напон. На сл. 7.7 точката С го означува моментот кога ZnO одводник почнува да ја одведува импулсната струја.

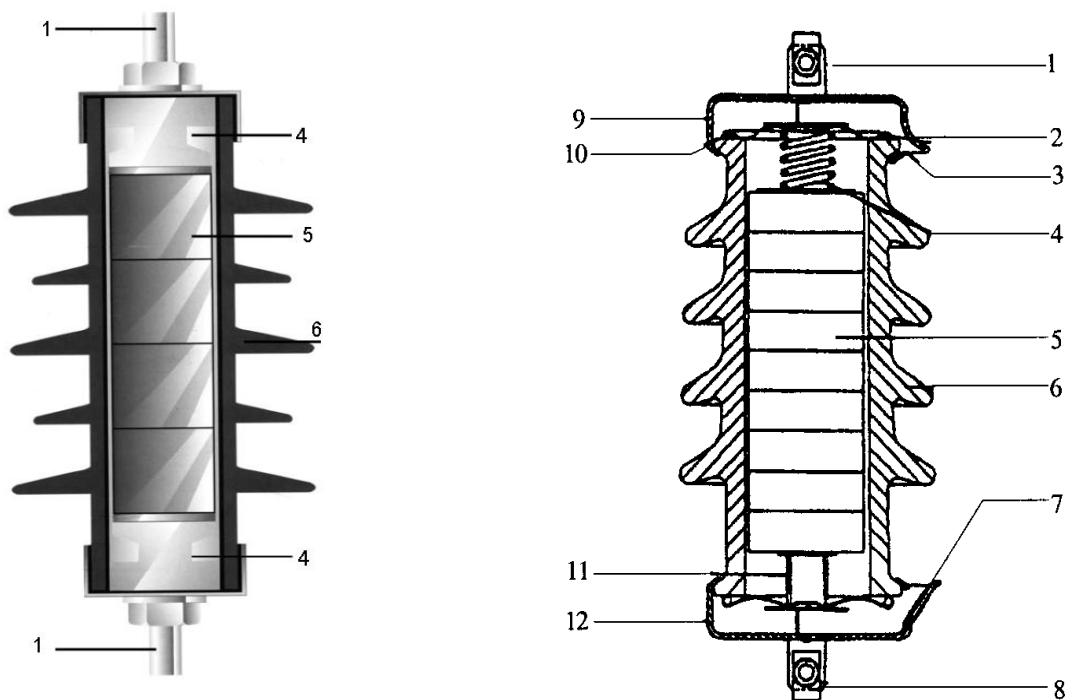


Сл. 7.7. Споредба на појавите за време на реагирањето на ZnO и вентилен одводник

Општо земено кривите на преостанатиот напон на двата типови одводника малку заемно се разликуваат и тие се, во основа, слични. Но ако се земе предвид дека енергетската способност на блоковите од ZnO одводници е значително поголема од истата кај класичните SiC одводници, произлегува дека може да се бираат ZnO одводници со помал номинален напон, а со тоа и со помал преостанат напон. На тој начин ZnO одводници овозможуваат да се постигне заштита од пренапони со значително подобри карактеристики.

### 7.2.2. Конструкција на ZnO одводници

На сликата 7.8. е прикажан напречниот пресек на еден ZnO одводник на пренапони со поважните елементи од неговата конструкција.



Слика 7.8. Конструкција на еден ZnO одводник на пренапони.

**Легенда:** 1. Стегалки за врска со спроводникот/земјоводот; 2. сигурностна мембрана; 3. отвор за испуштање на врелите гасови во случај на појава на електричен лак; 4. пружина за постигнување на потребниот контактен притисок помеѓу блоковите нелинеарни отпори и спроводните делови; 5. нелинеарни ZnO отпорници; 6. порцеланско куќиште; 7. отвор за испуштање на врелите гасови во случај на појава на електричен лак; 8. долна стегалка (клема) за врска со заземјувањето; 9. горна метална капа; 10. заптивка (дихтунг) помеѓу мембраната и куќиштето; 11. дистантен цилиндар од спроводен материјал; 12. долна метална капа

### 7.2.3. Основни карактеристики на ZnO одводници

Основни карактеристики на еден ZnO одводник се следните:

- Номинален напон на одводникот;
  - Траен работен напон – тоа е ефективната вредност на максималниот работен напон 50 Hz на кој одводникот може да се приклучи;
  - Волт-секундна карактеристика за подносливиот напон со индустриска фреквенција
- Оваа карактеристика се дава во зависност о времетраењето на напонот а ја опишува способноста на одводникот да ги поднесува пренапоните со фреквенција 50 Hz;
- *Заштитно ниво на одводникот на пренапони* – Тоа е најголемата од следните три вредности:
    1. преостанатиот напон при дејство на струен бран со стрмно чело;
    2. преостанатиот напон при дејство на стандардниот струен бран 8/20;
    3. преостанатиот напон при дејство на струја предизвикана од комутационен пренапон. Обично се усвојува дека времето на челото на овие бранови не ја надминува вредноста од 30  $\mu$ s.

– Номинална струја на одведување. Стандадните вредности на оваа струја се: 1,5 kA; 2,5 kA; 5 kA; 10 kA и 20 kA.

### 7.3. ИЗБОР НА ОДВОДНИЦИ НА ПРЕНАПОНИ

#### 7.3.1. Избор на класични SiC одводници

Изборот на класичниот одводник на пренапони се врши со постапка која што може да се подели во неколку чекори:

1. За одводникот којшто работи во мрежа со изолирана неутрална точка или пак неутрална точка заземјена преку придушница (Петерсенов калем) без автоматско исклучување на грешката, трајниот работен напон на одводникот треба да биде еднаков или повисок од максималниот фазен напон за време на земјоспојот.

2. Во мрежите со автоматско исклучување на земјоспојот трајниот работен напон на одводникот треба да биде еднаков или повисок од максималниот фазен напон на системот.

#### *Избор на номиналниот напон*

Номиналниот напон на одводникот мора да биде еднаков или поголем од максималниот привремен пренапон. Вообичаена практика е максималниот привремен пренапон да се бира како напон на исправната фаза према земја за време на траењето на земјоспојот. Но при изборот на одводникот треба да се води сметка и за можноста за истовремено настанување на привремени пренапони кои се резултат на коинциденцијата на два настана – како на пример истовременото настанување на земјоспој и нагло растоварување на системот. Привремените пренапони можат да се појават од повеќе причини од кои најважни се:

1. земјоспој во мрежата;
2. нагло растоварување на изворите во системот;
3. исклучување на куса врска;
4. Ферантиев ефект кај долгите слабо оптоварени водови, т.е. пораст на напонот на крајот од водот;
5. резонанција и ферорезонанција.

При изборот на одводникот треба да се избере номинален напон којшто е еднаков или повисок од напонот што се појавува на исправната фаза за време на земјоспојот. Односот помеѓу напонот на исправната фаза према земја на местото на поставувањето на одводникот и напонот према земја во нормален работен режим на истото место се нарекува *фактор на земјоспојот*. Привремениот пренапон при земјоспојот на база на кој што се бира номиналниот напон на одводникот се добива кога максималниот фазен работен напон се помножи со факторот на земјоспој. Факторот на земјоспој, пак, зависи пред сè од начинот на заземјување на неутралната точка но тој зависи и од параметрите на мрежата, или поточно кажано зависи од односот на еквивалентите реактанции за нулти и директен редослед  $X_0/X_d$ . кај мрежите со изолирана неутрална точка факторот на земјоспој е најчесто еднаков на  $\sqrt{3}$ , но тој може да биде и поголем доколку е  $X_0 < 0$ . Кај мрежите со ефикасно заземјена неутрална точка факторот на земјоспој најмногу изнесува 1.4.

#### *Оценка на амплитудата на струјата на празнењето низ одводникот*

**Очекуваната струја** што ќе тече низ одводникот за време на импулсниот преоден период зависи од следните фактори:

1. Сложеност на постројката и номиналниот напон на системот;
2. Дали приклучните надземни водови во постројката се снабдени со заштитни јажиња;

3. Должината на штитената зона пред постројката, доколку приклучните водови имаат заштитни јажиња само пред самата постројка;
4. Ударната (импулсната) импеданција на заземјувањето на првите столбови од надземните водови;
5. Бројот на приклучените водови на соборниците од постројката;
6. Подносиливиот напон на изолацијата на приклучните водови. За надземните водови со дрвени столбови може да се очекува значително зголемување на струјата низ одводникот за време на празнењето во однос на истата за случајот кога се работи за водови со бетонски или челично-решетки столбови. Ова може да се елиминира доколку се изврши заземјување на металната конзола на првиот дрвен столб пред постројката.

### ***Избор на класата на одводникот***

Врз основа на очекуваната струја на празнењето се бира *класата* на одводникот на пренапони. Според препораките на IEC одводниците од класата 10 kA се бираат во следните случаи:

1. кај поважните постројки;
2. во подрачја со изразена грмежна активност (на пример за подрачја со керауничко ниво од над 15 денови со грмотевици годишно);
3. кога приклучните водови не се ефикасно заштитени од удари на гром;
4. кога отпорноста на столбовите во природниот дел кон постројката (во должина од околу 1 km) ја надминува вредноста од 10  $\Omega$  поради опасноста од појава на повратни прескоци.
5. кога се користат дрвени столбови без заземјени конзоли на приклучните водови;
6. кога бројот на приклучните водови во постројката е помал од 3.

Одводници од класата на 5 kA се употребуваат во следните случаи:

1. за заштита на дистрибутивни трансформатори со помача важност (моќност);
2. во подрачјата со мала грмежна активност (керауничко ниво под 15);
3. кога приклучните водови се ефикасно заштитени со заштитни јажиња;
4. кога отпорностите на распростирање на заземјувачите од столбовите се под 10  $\Omega$ .

### ***Струја на растоварување на долгите водови***

Доколку се очекува можност за течење на струи на растоварување на долги водови, кабли или кондензаторски батерии за време на комутации низ одводникот, тогаш се применуваат одводници од класата 10 kA за тешки услови на работа кои можат да ги поднесат долготрајните струи на растоварување. Ваквите одводници, по правило, се применуваат во високонапонските мрежи 400 kV или повисоко. Во мрежите со пониски номинални напони одводници за тешки услови на работа се применуваат само во постројките со голема важност или кога на собирниците во постројката се приклучени долги надземни или кабелски водови. Во сите останати случаи се променуваат одводници за нормални услови на работа со номинална струја на одведување 10 или 5 kA.

### ***Класа за заштита од натпритисок***

Ако дојде до внатрешен дефект во одводникот на пренапони, низ него ќе почне да тече струја на куса врска. Оваа струја мора да дејствува врз сигурноста мембрана со што би се спречила експлозијата на одводникот. За таа цел е неопходно подносиливата струја на куса врска да биде еднаква или поголема од соодветната струја на куса врска што може да се појави на местото на приклучување на одводникот.



### **Ограничување на комутационите пренапони**

Одводниците за мрежи со номинален напон над 220 kV по правило се предвидени да вршат ограничување и на комутационите (склопните) пренапони затоа што кај таквите мрежи основниот проблем со заштитата од пренапони е најчесто сврзан токму со комутационите пренапони. Во мрежите со пониски напони одводниците треба да штитат од склопните пренапони само доколку имаат посебна намена како што е, на пример, заштитата на неутралната точка на мрежата и слично.

### **Специјални барања**

По потреба, пред одводниците на пренапони се поставуваат и посебни барања како на пример:

1. примена на одводници за подрачја со многу високо загадување така што тие да можат да се чистат (мијат) под напон;
2. одводници за подрачја со многу јаки ветрови;
3. одводници отпорни на земјотреси.

### **7.3.3. Избор на ZnO одводници**

Изборот на ZnO одводници се врши во три чекори:

1. Определување на параметрите на системот;
2. Проверка на ненормалните услови на работа во системот и
3. Избор на номиналниот напон.

### **Определување на параметрите на системот**

Најважен параметар на системот е *максималниот дозволен работен напон*  $U_{rab,max}$ , кој е обично за 5 до 10% повисок од номиналниот напон на системот. Тој се однесува на ефективната вредност на линискиот (меѓуфазниот) напон.

Друг важен параметар е висината и траењето на *привремениот пренапон*  $U_{temp}$ . Привремените пренапони најчесто се определуваат како пренапони на исправната фаза во услови на земјоспој. За разлика од SiC одводници, овде, кај ZnO одводници, траењето на привремените пренапони е многу важно бидејќи за целото време додека трае привремениот пренапон ZnO одводник е изложен на зголемени струи на одведување т.е. на зголемени термички напрегања. Притоа доколку не се располага со точните времиња на подесеност на заштитата, според препораките на ИЕС се усвојува дека траењето на земјоспојот во преносната мрежа изнесува до 3 s, додека во дистрибутивните мрежи со заземјена неутрална точка се зема дека трењето на земјоспојот изнесува 10 s. Кај дистрибутивните мрежи со изолирана неутрална точка траењето на земјоспојот може да биде од неколку секунди до неколку денови.

### **Проверка на ненормалните услови на работа**

Понекогаш во системот со заземјена неутрална точка може да се создадат услови при кои на некои места во системот, на "здравите" т.е. исправните фази ќе се појават напони повисоки од очекуваните. Тоа се случува, на пример, при разземјување на неутралните точки на некои енергетски трансформатори што работат во паралела со други што имаат заземјена неутрална точка. Затоа, во таквите случаи, ако се оцени дека постојат реални можности за ваквата појава, тоа треба да се земе предвид при избоот на карактеристиките на ZnO одводник на пренапони.

Исто така доколку постојат можности за истовремена појава на привремени пренапони поради земјоспој и испад на товарот што би довело до подигање на напонот, повторно таквиот случај треба да се земе предвид при изборот на одводникот на пренапони.

### Избор на номиналниот напон на одводникот

Номиналниот напон на еден ZnO одводник се избира на два начина:

1. врз основа на трајниот фазен работен напон  $U_{r.f}$  кој што е еднаков на фазната вредност на максималниот дозволен работен напон  $U_{rab.max}$  ( $U_{r.f} = U_{rab.max} / \sqrt{3}$ );

2. врз основа на привремениот пренапон за време на земјоспојот  $U_{temp} = k_f \cdot U_{r.f}$ , каде што  $k_f$  е фактор на земјоспојот кој за системите со директно заземјена неутрална точка изнесува 1,4 додека за изолираните системи тој изнесува 1,73.

Номиналниот напон пресметан на база на трајниот фазен работен напон се определува со помош на следниот израз:

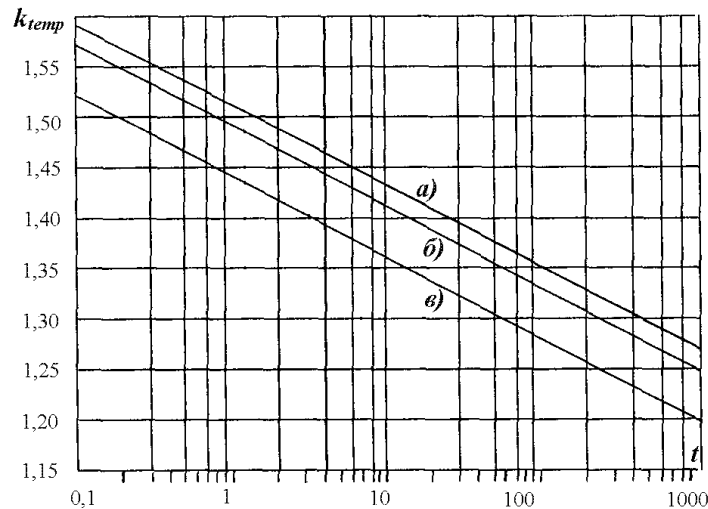
$$U_n = U_{r.f} / k_0 \quad (7.4)$$

каде што  $k_0$  е т.н. "фактор на изработка" – податок што го дава самиот производител. Вообичаена вредност на факторот на изработка е  $k_0 = 0,8$ .

Номиналниот напон на одводникот определен на база на привремениот пренапон  $U_{temp}$ , се пресметува со помош на изразот (7.5):

$$U_n = U_{temp} / k_{temp} \quad (7.5)$$

каде што  $k_{temp}$  е коефициент којшто ја зема предвид способноста на одводникот да поднесува привремени пренапони. Овој коефициент зависи од времетраењето на привремениот пренапон  $t$  а самата зависност е графички прикажана на дијаграмот од слика 7.9.



Слика 7.9. Зависност  $k_{temp}(t)$  на способноста на одводникот за поднесување на привремени пренапони при амбиентна темпартура  $\theta = 45^\circ\text{C}$ .

Легенда: а) без претходно термичко оптоварување на одводникот;  
б) термичко оптоварување со 4 kJ/kV; в) термичко оптоварување со 8 kJ/kV

Според некои производители на ZnO одводници, номиналниот напон на одводникот се пресметува според релацијата (7.6) во која фигурира максималниот фазен работен напон  $U_{r.f}$  и повторно коефициентот  $k_{temp}$ .

$$U_n = U_{r.f} / k_{temp} \quad (7.6)$$

Со помош на некој од изразите (7.4) – (7.6), кој дава најголема вредност за  $U_n$ , се пресметува номиналниот напон на одводникот. Потоа, неговата конечна вредност се добива со заокружување на првата поголема вредност од стандардните вредности за номинални напони коишто ги нуди производителот на опремата.

#### 7.4. ИЗБОР НА МЕСТОТО НА ПОСТАВУВАЊЕ НА ОДВОДНИКОТ НА ПРЕНАПОНИ

Одводникот на преанпони, во принцип, се поставува така што да биде најблиску до штитениот објект. Во високонапонските постројки и трафостаници тоа е најчесто енергетскиот трансформатор бидејќи тој е најважен и наедно најскап елемент на постројката. Максималното дозволено растојание  $l_{\max}$  од одводникот до трансформаторот (односно штитениот објект), во тој случај, може приближно да се определи со помош на следната релација:

$$l_{\max} \approx \frac{U_{\text{подн}} - (U_z + U_V)}{2 \cdot S} \cdot v, \quad (7.7)$$

каде што е:

$U_{\text{подн}}$  – поднослив ударен напон на трансформаторот односно штитениот објект;

$U_z$  – заштитно ниво на одводникот на преанпони;

$U_V$  – пад на напон на врските на одводникот со собирницата и заземјувачот;

$S$  – очекувана стрмнина на пренапонскиот бран. Најчесто се усвојува вредност не поголема од 1000 kV/ $\mu$ s;

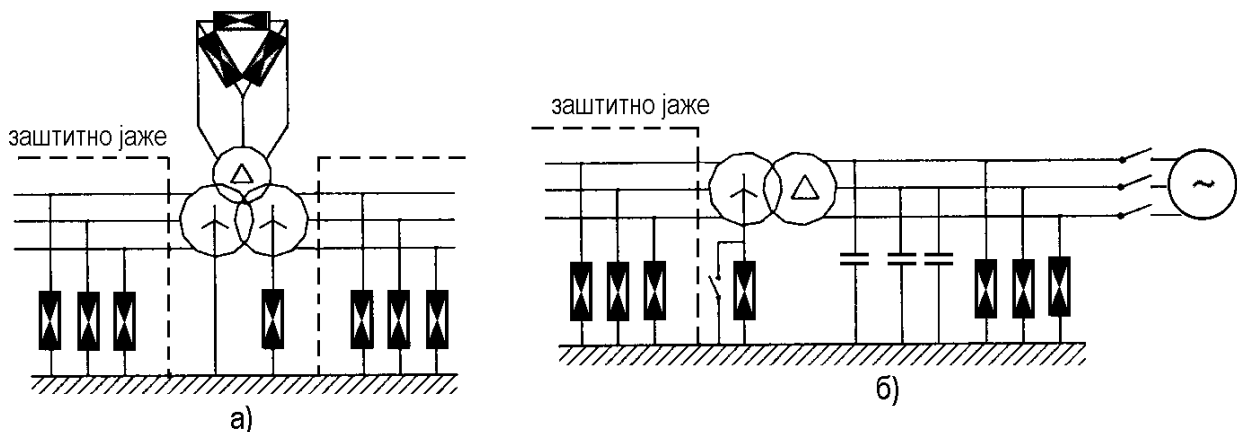
$v$  – брзина на простирање на пренапонскиот бран.

Притоа е претпоставено дека одводникот и штитениот објект се поврзани на ист заземјувач.

Падот на напон  $U_V$  на врските на одводникот изнесува:

$$U_V \approx L_1 \cdot l_V \cdot \frac{di}{dt}, \quad (7.8)$$

каде што  $L_1$  е индуктивност по метар должина на врските на одводникот (обично се усвојува дека е  $L_1 = 1 \mu\text{H/m}$ ), додека  $l_V$  е вкупната должина на тие врски (должина на поврзниот вод од одводникот до фазниот спроводник плус должината на поврзниот вод од одводникот до заземјувачот). Стрмнината на струјниот бран  $di/dt$  се определува под претпоставката дека одводникот ја одведува својата номинална струја.



Слика 7.10. Типичен распоред на одводниците на преанпони

На сликата 7.10 е прикажан типичниот распоред на одводниците на преанпони кај тринамотните трансформатори (7.10а) и кај блок-трансформаторите (7.10б).

## 8. КООРДИНАЦИЈА НА ИЗОЛАЦИЈАТА

Координацијата на изолацијата претставува ускладување на заштитните нивоа на одводникот на пренапони и другите заштитни уреди со подносливите напони на штитената опрема со цел да се намали ризикот од дефекти и/или, доколку веќе настанал дефект, штетата предизвикана од него да се сведе на најмала можна мера. За таа цел со соодветни стандарди се пропишуваат обликот и вредноста на напонот што опремата мора да го издржи но се пропишуваат и начините на таквите проверки.

Со цел да се утврди диелектричната цврстина на опремата во однос на привремените пренапони опремата се испитува со повишени напони 50 Hz во траење од 1 минута.

Во однос на пренапоните со споро чело, какви што се некои склопни пренапони ( $20 \mu s \leq T_c \leq 5000 \mu s$ ;  $T_z \leq 20 ms$ ) диелектричната цврстина на изолацијата се испитува со ударен напон со облик 200/2500  $\mu s/\mu s$ .

Во однос на пренапоните со брзо чело (главно од атмосферско потекло), за кои времето на чело се движи во границите  $0,1 < T_c < 20 \mu s$  и времето на грбот  $T_z < 300 \mu s$ , диелектричната цврстина на изолацијата се проверува со стандарден ударен напон со облик 1,2/50  $\mu s/\mu s$ .

Во табелите 8.1 и 8.2 се наведени стандардните вредности на подносливите напони. Кога во согласност со соодветната табела се избере изолационото ниво на опремата, со изборот на видот, карактеристиките и местото на поставувањето на одводниците на пренапони треба да се обезбеди изолационото ниво да не биде пречекорено.

Табела 8.1. Стандардни степени на изолацијата  
за подрачјето I ( $1 \text{ kV} < U_{r,\text{max}} \leq 245 \text{ kV}$ )

Највисок напон на опремата – ефективна вредност (kV)	Стандарден поднослив краткотраен напон 50 Hz – ефект. вредност (kV)	Стандарден поднослив атмосфер. ударен напон – темена вредност (kV)
3,6	10	20
		40
7,2	20	40
		60
12	28	60
		75
		95
17,5	38	75
		95
24	50	95
		125
		145
36	70	145
		170
52	95	250
72,5	140	325
123	(185)	450
	230	550
145	(185)	(450)
	230	550
	275	650
170	(230)	(550)
	275	650
	325	750
245	(275)	(650)
	(325)	(750)
	360	850
	395	950
	460	1050

Табела 8.2. Стандардни степени на изолацијата  
за подрачјето II (  $U_{r,max} > 245 \text{ kV}$  )

Највисок напон на опремата – еф. вредност (kV)	Стандарден поднослив склопен ударен напон			Поднослив атм. ударен напон (kV) (темена вред.)
	Подолжна изо- лација (kV) (темена вред.)	Фаза спрема земја (kV) (темена вр.)	Фаза спрема фаза (kV) (темена вр.)	
300	750	750	1,5	850 950
	750	850	1,5	950 1050
362	850	850	1,5	950 1050
	850	950	1,5	1050 1175
420	850	850	1,6	1050 1175
	950	950	1,5	1175 1300
	950	1050	1,5	1300 1425
525	950	950	1,7	1175 1300
	950	1050	1,6	1300 1425
	950	1175	1,5	1425 1550
765	1175	1300	1,7	1675 1800
	1175	1425	1,7	1800 1950
	1175	1550	1,6	1950 2100

## 9. ЗАШТИТА НА НАДЗЕМНИТЕ ВОДОВИ ОД АТМОСФЕРСКИ ПРЕНАПОНИ

### 9.1. ОПШТО

Како најчести причини за дефектите односно испадите на надземните водови се јавуваат пренапоните. Напоните на надземниот вод кои се јавуваат при удар на гром најчесто претставуваат пренапон. Пренапон, всушност, претставува напон помеѓу фазата и земјата, или напон помеѓу фазите, чија што темена вредност ја надминува соодветната максимална вредност на најголемиот напон на опремата, односно на надземниот вод.

Атмосферскиот пренапон е фазен или меѓуфазен пренапон на некое место долж водот предизвикан од атмосферско празнење. Може да настане во следните три случаи:

- при директен удар на гром во фазен спроводник,
- при удар на гром во столбот или заштитното јаже,
- при удар на гром во близина на надземниот вод.

Теориските анализи и експерименталните податоци укажуваат на тоа дека напоните индуцирани од атмосферските празнења во земјата во близина на водовите ретко надминуваат 200 – 300 kV и тие пренапони се од интерес само за среднонапонските (СН) и нисконапонските (НН) водови.

Денес не е можно со помош на економски прифатливи мерки да се изведат водови кои би биле напивно заштитени од испади предизвикани од атмосферски празнења. Затоа основна задача на заштитата од атмосферски празнења е да се намали бројот на испадите до економски прифатливи граници.

Директните удари на громот во фазните спроводници скоро секогаш доведуваат до испад на надземниот вод. Затоа преносните водови со номинален напон  $U_n \geq 110$  kV, без исклучок, а многу често и надземните водови со номинален напон  $U_n = 35$  kV, денес се штитат од овој вид пренапони со помош на заштитни јажиња, кои ги примаат врз себе скоро сите празнења. На тој начин испадите поради удар на громот во фазен спроводник се практично елиминирани.

Во практиката изолацијата на надземните водови се димензионира во согласност со определени норми, односно прописи, при што основа за димензионирањето е усвоеното напонско ниво. При појава на атмосферски пренапони е можно да дојде до појава на пренапони кои го пречекоруваат подносливиот напон на изолацијата. Водовите со засилена изолација ќе бидат поскапи, но затоа ќе бидат подоверливи во погонот во однос на оние кои се димензионирани поскромно. Затоа димензионирањето на изолацијата на еден надземен вод треба да претставува оптимален компромис помеѓу цената на изолацијата на водот и неговата доверливост.

За да се утврди доверливоста на работата на изолацијата на водот, потребно е да се знае со која веројатност можат да се јават прескоци на изолацијата под дејство на атмосферски пренапони, колкав е очекуваниот број на прескоци во определен временски период, потоа колкав е бројот на испади и колкав е просечниот временски период помеѓу два последователни прескоци и испади. На тој начин доверливоста на работата на изолацијата на водот може да се процени врз основа на следните параметри: ризик за прескок  $R$ , очекуван годишен број на прескоци  $N_{pr}$ , очекуван годишен број на испади  $N_{isp}$  и просечни интервали на време меѓу два последователни прескоци и испади.

Бројот на удари на гром  $N_L$  на еден вод во текот на една година може да се определи од релацијата:

$$N_L = N_g \cdot L \cdot W \cdot 10^{-3} \quad (9.1)$$

каде што се:

$N_g$  – густина на празнења облак - земја (удари/ $\text{km}^2$ .год) ( $N_g = 0,04 \cdot T_d^{1,25}$ );

$L$  – должина на водот (km);

$W = 28h_{st}^{0,6} + b_{zj}$  – широчина на појасот земја од кој водот ги прима врз себе ударите на молња (m);

$H_{st}$  – просечна височина на столбовите (m),

$b_{zj}$  – растојание меѓу заштитните (земјоводните) јажиња (m).

Ако е познат ризикот  $R$  да настане прескок при појава на определен вид атмосферски пренапон, тогаш годишниот број на прескоци  $N_{pr}$  на изолацијата ќе биде:

$$N_{pr} = N_g \cdot L \cdot W \cdot 10^{-3} \cdot R = N_L \cdot R \quad (9.2)$$

Прескокот на надворешната изолација, каква што е изолацијата на надзмените водови, не предизвикува нејзино оштетување. По прескокот и гаснењето на лакот самостојно може да се обноват нејзините карактеристики и таа е способна да работи понатаму, без интервенција.

Бројот на испади (т.е. прекини на снабдувањето со електрична енергија) на водот како резултат на определен вид атмосферско празнење, општо земено, е помал од бројот на прескоци на изолацијата. Испадот на водот настанува само ако импулсниот прескок на изолацијата премине во лак кој е поддржуван од работниот напон, чие време на постоење е еднакво или поголемо од времето на дејствување на релејната заштита. Веројатноста  $\eta_L$  импулсниот прескок да премине во енергетски лак зависи, пред сè, од градиентот на работниот напон по должината на патот на прескок, во моментот на настанувањето на самиот прескок. Ако тој градиент е недоволен (помал од 5 kV/m по должината на изолаторските вериги), енергетскиот лак може и воопшто да не се појави и водот нема да испадне. Но сепак оваа веројатност е прилично висока (нпр.  $\eta_L = 0,93$  кај 110 kV надземни водови) така што честопати се усвојува  $\eta_L = 1$ .

Според тоа, вкупниот број на испади на еден вод во текот на една година изнесува:

$$N_{isp} = \eta_L \cdot N_L \cdot R \quad (9.3)$$

Доколку се предвидува и АПВ за водот, тогаш бројот на испади  $N_{isp}$  е:

$$N_{isp} = \eta_L \cdot N_L \cdot R \cdot (1 - P_{APV}) \quad (9.4)$$

каде што  $P_{APV}$  е веројатност за успешност на АПВ (може да се оцени дека  $P_{APV}$  е околу 0.7 – 0,8).

Од последниот израз се гледа дека за да се намали бројот на испади на водот предизвикани со атмосферски празнења треба, пред сè, да се намали ризикот  $R$ , т.е. веројатноста за настанување на прескок на изолацијата. Тоа се реализира на разни начини: со изведба на заземјувачи на столбовите кои имаат мала преодна отпорност, со поставување на земјоводни јажиња и нивно добро заземјување, со зголемена импулсна цврстина на изолацијата и др. Благодарение на тоа се намалува веројатноста од повратен прескок при директен удар на громот врз надземниот вод.

Како прифатлив годишен број на испади од атмосферски пренапони на 100 km должина од надземните водови се смета бројката од неколку испади/годишно. Притоа, кај преносните водови со напон  $U_n \geq 220$  kV се прифатливи и вредности помали од еден испад годишно додека поголемите вредности се однесуваат на среднапонските (дистрибутивни) водови.

Надземните водови во еден ЕЕС поради својата голема должина и експонираност на надворешните влијанија се перманентно изложени на атмосферски пренапони било поради

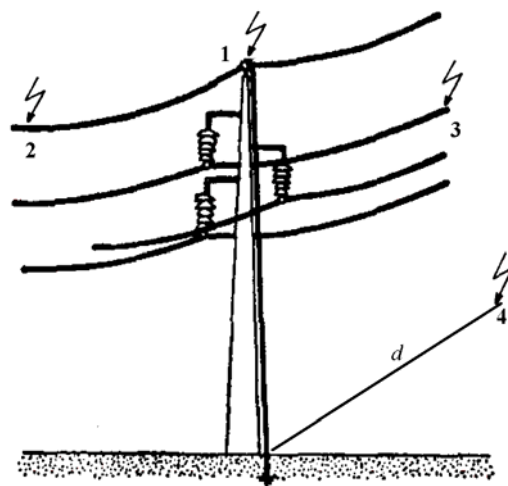


директните удари на громот во самите водови, било поради атмосферските празнења во нивната непосредна близина. Во прво време, во самиот зачеток на светската електрификација проектантите на надземните водови не се ни труделе да ги заштитуваат водовите од директните удари на громот, сметајќи дека таа појава е многу ретка и дека во исто време воопшто не е можна ефикасна заштита од директните удари. Затоа во тие први зачетоци на развојот на ЕЕС изолацијата се димензионирала на индуцираните пренапони под дејство на блиски удари на громот.

Но праксата покажала дека индуцираните пренапони се за поголемиот дел од надземните водови, особено за водовите со напон  $U_n \geq 110 \text{ kV}$ , безопасни бидејќи тие ретко можат да надминат вредност од 300 – 400 kV дури и при сосема блиските празнења.

Со текот на времето се прифатил ставот дека директните удари се, сепак, можни и извесни. Од тогаш наваму надземните водови почнуваат да се градат земајќи ја предвид и таа опасност така што се развила техника за заштита од директните удари на гром со помош на заштитно (громобранско) јаже кое што се поставува над фазните спроводници, на доволна височина (слика 9.1).

На сликата 9.1 се прикажани и местата на кои што може да дојде до удар на гром така што ударот да предвика оштетување на водот или негов испад.



**Слика 9.1. Можни места на атмосферското празнење: 1) удар во столб; 2) удар во з. јаже; 3) удар во фазен спроводник; 4) удар во близина на водот**

## 9.2. РАСПРЕДЕЛБА НА ПРАЗНЕЊАТА ВО БЛИЗИНА НА НАДЗЕМНИТЕ ВОДОВИ

На сликата 9.2 е шематски е прикажана распределбата на местата на кои што може да дојде до удар на громот и можниот резултат од таквиот настан.

Просечниот број на удари на водот  $N_L$ , може да го разделиме на три дела:

$$N_L = N_{st} + N_{zj} + N_d \quad (9.5)$$

каде што е:

$N_{st}$  – удари во столбот;

$N_{zj}$  – удари во заштитното јаже,

$N_d$  – директни удари во фазниот спроводник.

Во општ случај до празнење може да дојде на било кое место од водот.

Порано се сметало дека приближно 50 % од вкупниот број на удари  $N_L$  отпаѓа на удари во столбот  $N_{st}$ . Меѓутоа во поново време е утврдено дека односот  $N_{st}/N_L$  битно зависи од распонот на водот  $l$ , т.е. од напонското ниво. Така на пример, просечниот број на столбови на 100 km должина на еден 110 kV вод може да изнесува 400 па дури и повеќе, додека кај еден 380 kV вод тој број е најчесто помал од 300. Поради тоа, кај високонапонските водови односот  $N_{st}/N_L$  е значително помал од истиот однос кај среднонапонските водови.

Врз основа на испитувањата, за овој однос е утврдена следната релација:

$$N_{st} = 4 \cdot N_L \cdot \frac{H_{st}}{l} \quad (9.6)$$

каде што се:

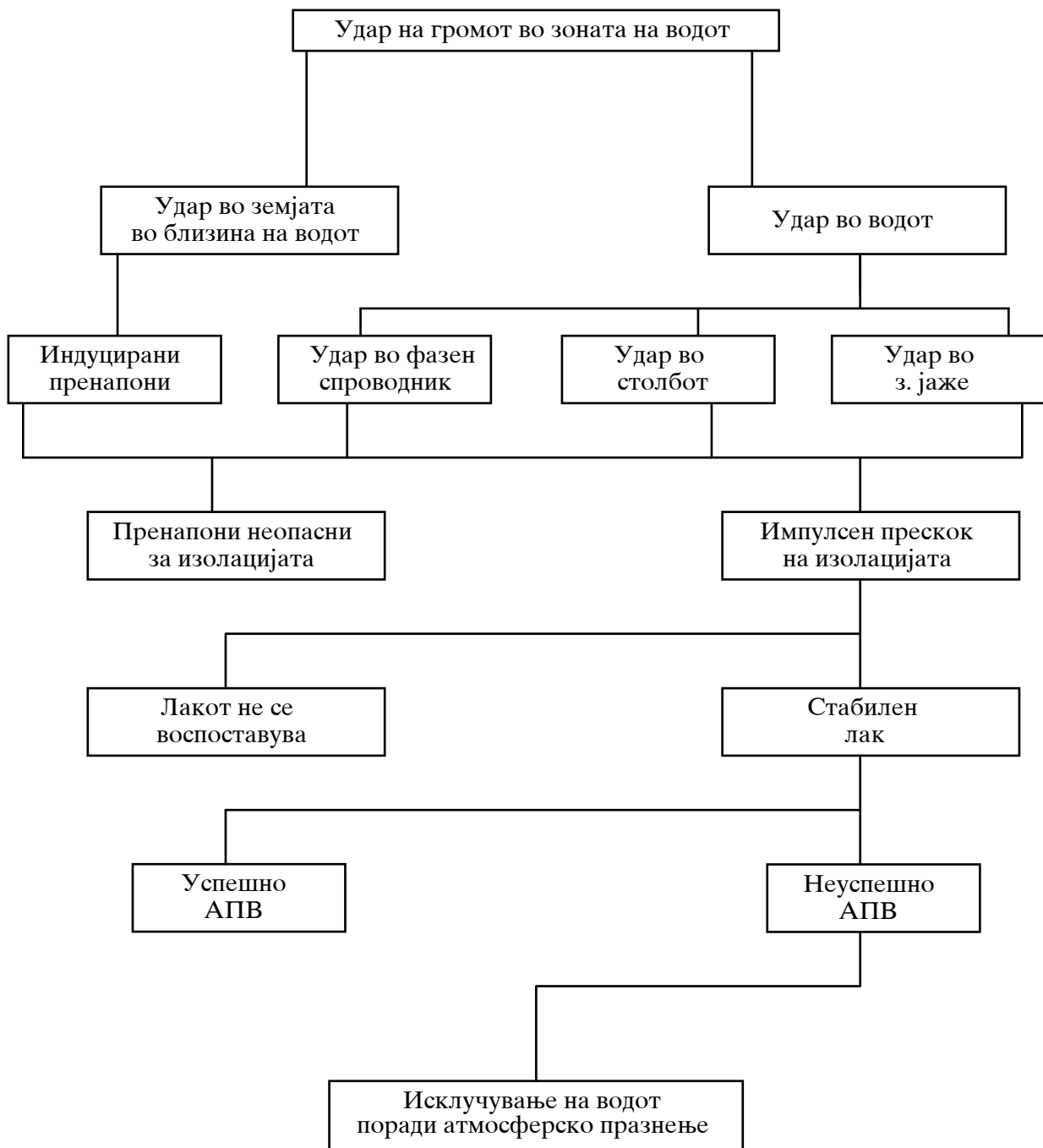
$H_{st}$  (m) – просечна висина на столбовите,

$l$  (m) – просечна вредност на распонот на водот.

Со оглед на тоа дека директните удари во фазниот спроводник се многу помали од ударите во столбот ( $N_d \ll N_{st}$ ), за бројот на удари во заштитното јаже се добива:

$$N_{zj} = N_L - N_{st} = N_L \cdot \left(1 - \frac{4H_{st}}{l}\right) \quad (9.7)$$

Од сите три вида на удари, ќе кажеме дека ударот на гром во столбот на водот претставува најголем извор на опасни пренапони.



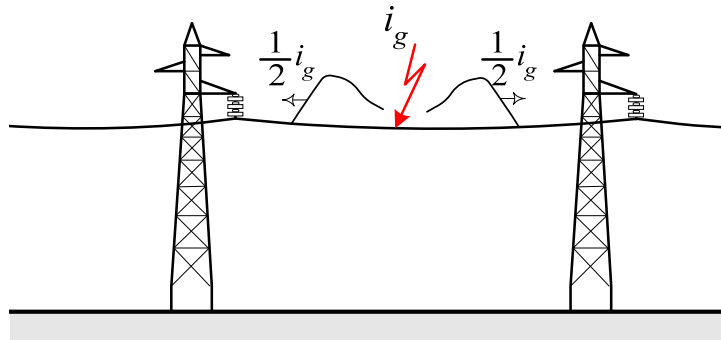
Слика 9.2 Хаварии на водовите при атмосферски празнења

### 9.3. ДИРЕКТЕН УДАР НА ГРОМ ВО ФАЗЕН СПРОВОДНИК

До директен удар на гром во фазен спроводник доаѓа во два случаја:

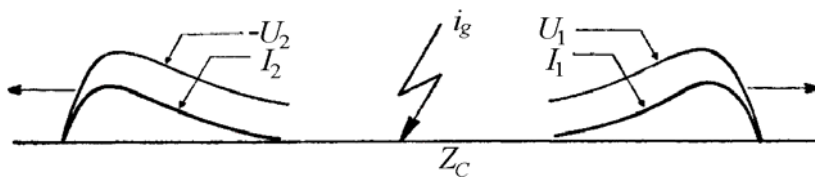
- кога надземниот вод нема заштитно јаже (тоа се најчесто дистрибутивните водови до 35 kV) и,
- кога и покрај постоењето на заштитното јаже доаѓа до удар на гром во фазниот спроводник.

Ќе го посматраме најнапред случајот кога е водот без заштитно јаже, што е типично во нашата практика кога станува збор за надземни водови со номинален напон  $U_n \leq 20$  kV.



Сл. 9.3. Директен удар на гром во фазен спроводник од надземниот вод

Нека дошло до директен удар на громот во некој од фазните спроводници. При директен удар на гром во фазниот спроводник настануваат два идентични патувачки брана кои се движат во различни насоки долж водот (сл. 9.3). Во тој случај помалиот дел од струјата на громот  $i_g$  ќе се одбие од местото на ударот и ќе се врати назад по каналот на громот, додека поголемиот дел од упадниот бран по каналот на громот при ударот во фазниот спроводник ќе се инјектира во спроводникот и во форма на два струјни брана  $I_1$  и  $I_2$ , односно напонски брана,  $U_1$  и  $U_2$ , ќе почне да се простира по спроводникот лево и десно од местото на ударот (сл. 9.4).



Слика 9.4. Простирање на формираните струјни и напонски бранови по фазниот спроводник

Создадените напонски бранови, на изолацијата од водот создаваат напрегања кои истата најчесто не може да ги издржи. Со пречекорување на критичниот напон на изолацијата доаѓа до прескок и создавање на електрична искра која најчесто се претвора во земјоспој или еднофазна куса врска. За да настане прескок на изолацијата, треба да биде исполнето:

$$U_{iz} \geq U_{50\%} \quad (9.8)$$

каде  $U_{50\%}$  е подносиливиот ударен напон на изолаторите.

Заштитата на надземните водови од испади, предизвикани од вакви пресоци, се заснова на механизмот на исклучување и повторно брзо вклучување на водот (АПВ).

Ако со  $i$  го означиме делот од струјата на громот што се инјектирала во фазниот спроводник на местото на ударот, тогаш ќе имаме:

$$i = i_g \cdot \frac{Z_g}{Z_g + Z_C / 2} = i_g \cdot \frac{Z_g}{Z_g + Z_2}; \quad Z_2 = \frac{Z_C}{2}, \quad (9.9)$$

$$I_1 = \frac{i}{2}; \quad U_1 = Z_C \cdot I_1 = Z_C \cdot \frac{i}{2}, \quad (9.10)$$

$$I_2 = \frac{i}{2}; \quad U_2 = Z_C \cdot I_2 = Z_C \cdot \frac{i}{2}. \quad (9.11)$$

Ако со  $U_{50\%}$  ја означиме 50% импулсна цврстина на изолацијата на водот, тогаш прескок на изолацијата ќе настане ако е  $i \geq I_Z = U_{50\%} / Z_2 = 2U_{50\%} / Z_C$ . Притоа величината:

$$I_Z = \frac{2U_{50\%}}{Z_C}, \quad (9.12)$$

се нарекува *заштитно ниво на изолацијата* на водот.

Да ја процениме големината на пренапоните што се јавуваат на погодениот спроводник при директен удар на громот во него и веројатноста за појава на повратен прескок за еден 110 kV далекувод. Нека усвоиме дека е  $Z_C = 400 \Omega$  (при што во таа вредност е земена предвид и појавата на корона) и нека импеданцијата на каналот на громот е  $Z_g = 1500 \Omega$ , што изнесува нешто помеѓу 1000 и 3000  $\Omega$  – вредности на кои што се проценува големината на импеданцијата на каналот на громот за мали струи. Тогаш за 110 kV водови, чија изолација има импулсна цврстина од редот на  $U_{50\%} = 600 \text{ kV}$ , ќе добиеме:

$$I_Z = \frac{2U_{50\%}}{Z_C} = \frac{2 \cdot 600}{400} = 3 \text{ kA},$$

$$i_g = I_Z \cdot \frac{Z_C / 2}{Z_g + Z_C / 2} = 3 \cdot \frac{200}{1500 + 200} = 3,4 \text{ kA},$$

$$P_{pr} = P(I_m > i_g) = \exp\left(-\frac{i_g}{26,1}\right) = 0,878 \quad (\text{според експоненцијалниот модел 3.1}).$$

Значи веројатноста за појава на прескок на изолацијата  $P_{pr}$  при директен удар на гром во фазен спроводник дури и кај 110 kV водови е многу висока.

Ако истата постапка ја повториме и за другите напонски нивоа на надземните водови ќе ја добиеме следната табела.

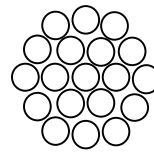
**Табела 9.1. Заштитни нивоа и веројатност за прескок на изолацијата кај надземните водови**

$U_n$ (kV)	$U_{50\%}$ (kV)	$Z_C$ ( $\Omega$ )	$I_Z$ (kA)	$P_{pr}$
10	75	400	0.425	0.988
35	215	400	1.218	0.954
110	600	400	3.40	0.878
220	1050	400	5.95	0.796
380	1425	300	9.50	0.670

Од резултатите прикажани во последната табела заклучуваме дека директните удари на громот во фазните спроводници се опасни дури и за водовите со највисок напон и по правило, тие предизвикуваат појава на повратен прескок или пробој на изолацијата. Исклучок се водовите со дрвени столбови – случај којшто ќе биде посебно третиран во наредниот дел.

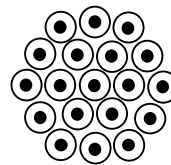
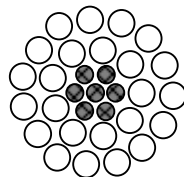
Од изложеното произлегува дека надземните водови треба да бидат заштитени од директни удари на громот во фазните спроводници. Во практиката тоа се постигнува со поставување на заштитно јаже на врвот од столбовите на водот. Кај нас е вообичаено надземните водови со напон  $U_n \geq 35 \text{ kV}$  да се изведуваат со заштитни (громобрански) јажиња. Кај 35 kV водови за таа цел се користат челични јажиња од типот Fe III  $35 \text{ mm}^2$ , додека кај 110 kV надземни водови за таа цел најчесто се користат челични јажиња од типот Fe III  $50 \text{ mm}^2$ , иако во последно време, од други причини, во употреба навлегуваат и комбинирани Al/Fe јажиња како заштитни (најчесто Al/Fe  $50/30 \text{ mm}^2$  или Al/Fe  $95/55 \text{ mm}^2$ ). Кај 220 kV водови досега обично се применува јажињата Fe III  $70 \text{ mm}^2$ , но во поново време кај овие водови се вградуваат јажињата Al/Fe  $120/70 \text{ mm}^2$ . И конечно, наша пракса е кај 380 kV водови да се вградуваат по 2 биметални заштитни јажиња од типот "алумовелд" – AWg 126,1. Последниве се изведени од двометални (биметални) жици коишто имаат челично срце околу кое, по пат на електролиза, е нанесен слој од алуминиум кој што има задача да ја намали нивната активна отпорност но во исто време и да го заштити челичното срце од корозија (слика 9.5).

еднометален ○  
двометален ●



а) Едножилен спроводник, еднометален и двометален

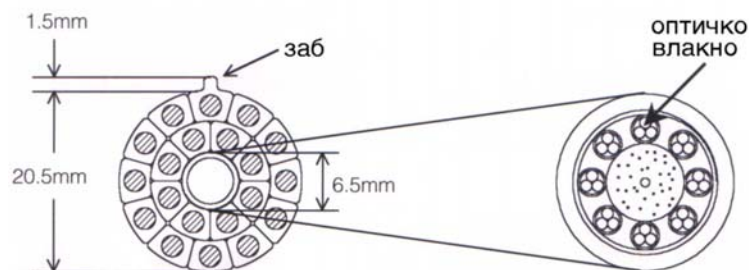
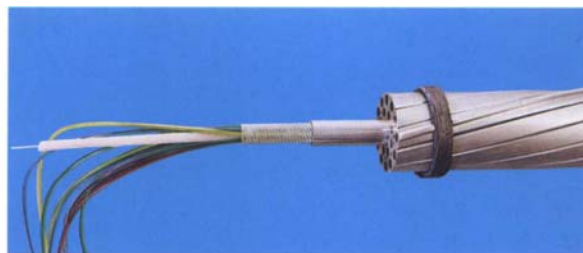
б) Повеќежилен спроводник/јаже (хомогено јаже)



в) Комбинирано јаже од два метала (Al/Fe)

г) Биметално јаже (*alumoweld, copperweld*)

Класична конструкција на јажињата за надземните водови



Пресек на оптичко заштитно јаже (OPGW)

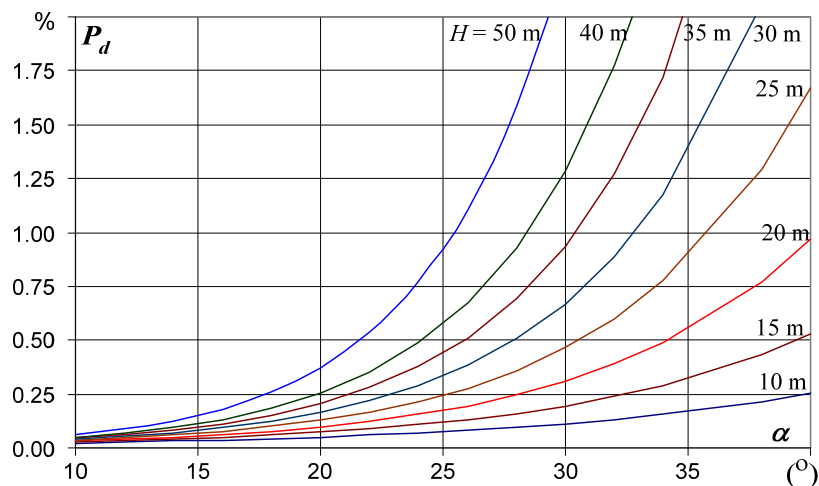
Слика 9.5. Современа конструкција на заштитно јаже за надземен вод со висок напон, со вграден оптички кабел

Во поново време заштитните јажиња служат и за пренос на информации. Современите конструкции на заштитното јаже во централниот дел имаат мала метална цевка во која се вградени повеќе оптички влакна (слика 9.5). Таквите јажиња се означуваат со ознаката OPGW.

Но и покрај тоа понекогаш, иако ретко, се случува, кај надземните водови изведени со заштитно јаже громот да ја "пробие" заштитата и да удри во фазен спроводник. Статистичката анализа на овој настан покажала дека веројатноста  $P_d$  за пробив на изолацијата и за директен удар во фазниот спроводник, во основа, зависи од големината на заштитниот агол  $\varphi$  и од квадратниот корен на височината на столбот  $H_{st}$ , сметана од површината на земјата до точката на зацврстување на заштитното јаже. Поточно кажано веројатноста  $P_d$  зависи од производот  $\varphi \cdot \sqrt{H_{st}}$  и може да се опише со следната емпириска релација:

$$\log P_d = \frac{\varphi \cdot \sqrt{H_{st}}}{90} - 4. \quad (9.13)$$

Во последната релација заштитниот агол  $\varphi$  се изразува во степени ( $^\circ$ ), додека височината  $H_{st}$  во (m).



Слика 9.6. Графички приказ на зависноста  $P_d(\varphi)$  на веројатноста за пробив на заштитата

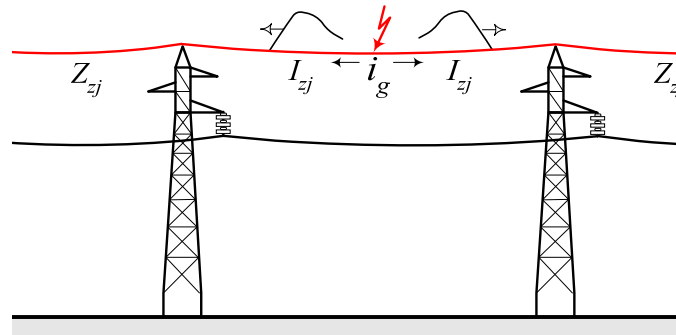
Врз основа на емпириската релација (9.13) е нацртан графикот од сликата 9.6 на кој што е прикажана зависноста на веројатноста  $P_d$  од заштитниот агол  $\varphi$ , за разни вредности на височината  $H_{st}$ .

Од сето ова може да заклучиме дека веројатноста громот да ја пробие заштитата и да удри во фазните спроводници може да се намали со смалување на заштитниот агол  $\alpha$ , но исто така и со зголемување на бројот на заштитни јажиња. Ова секако би довело до поскапување на водот, што значи би било оправдано само во случај кога станува збор за поважни водови кои минуваат низ региони со интензивни атмосферски празнења. Така, на пример, во многу земји надземните водови со номинален напон над 220 kV се изведуваат со помал заштитен агол од  $30^\circ$ , кој најчесто изнесува  $15^\circ$ – $20^\circ$ .

#### 9.4 УДАР НА ГРОМ ВО ЗАШТИТНОТО ЈАЖЕ ВО СРЕДИНА НА РАСПОНОТ

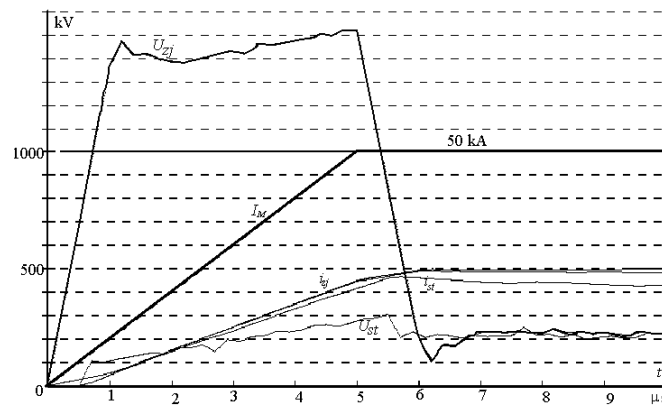
Ударот на гром во заштитното јаже ќе предизвика бранови процеси како на заштитното јаже, така и на фазните спроводници. Но во овој случај можноста за појава на прескок на изолацијата на соседните столбови или пак можноста за појава на прескок помеѓу заштитното

јаже и некој од фазните спроводници во средината од распонот е многу мала, практично безначајна.

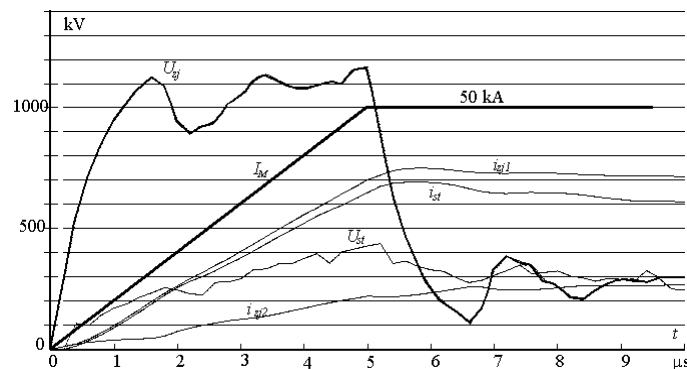


Слика 9.7. Удар на гром во заштитното јаже во средината од распонот

На сликата 9.8а е прикажан временскиот тек на напонот на заштитното јаже во точката на ударот (середина од распонот) за случај на удар на гром со стрмнина  $S = 10 \text{ kA}/\mu\text{s}$  и амплитуда  $I_m = 50 \text{ kA}$  ( $T_C = 5 \mu\text{s}$ ) во распон 300 m од еден 110 kV надземен вод со едно заштитно јаже Fe III 50 mm<sup>2</sup>. На сликата 9.8.б, пак, е прикажан временскиот тек на напонот кога ударот настанал на растојание  $x = 60 \text{ m}$  од левиот столб во распонот. Отпорностите на распростирање на соседните столбови притоа изнесувале  $R_{st} = 10 \Omega$ .



а) на средина од распонот



б) на  $x = 60 \text{ m}$  од левиот столб

Слика 9.8. Временски тек на напоните и струите при удар на гром во заштитно јаже

Под претпоставката дека импеданцијата на каналот на громот  $Z_g$  е приближно половина од импеданцијата на заштитното јаже  $Z_{zj}$  кое коронира (што е реално да се очекува кога се работи за големи струи на громот), може да се покаже дека во тој случај струјата во

заштитните јажиња  $I_{zj} = I_g/4$ , а максималната вредност на напонот  $U_{max}$  на воздушната изолација во средината на распонот во случајот кога струјата на громот има косоаголно чело и рамен грб, ќе биде:

$$U_{max} = \frac{Z_{zj} \cdot S \cdot \tau}{4} \cdot (1 - k_{zp}) \quad (9.14)$$

каде што  $k_{zp}$  е коефициентот на спрега помеѓу заштитното јаже и фазниот спроводник, додека  $\tau$  е време на простирање на струјниот бран на громот во посматраниот распон, т.е.  $\tau = l/c$ .

Од последниот израз заклучуваме дека максималната вредност на напонот на воздушната изолација зависи од стрмнината на струјата на громот  $S$  и од должината на распонот  $l = c \cdot \tau$ . Бидејќи прескочниот напон  $U_{presk}$  на воздушната изолација во импулсниот период е пропорционален на растојанието  $s$  помеѓу заштитното јаже и фазниот спроводник и приближно изнесува 750 kV/m, т.е.

$$U_p = 750 \cdot s \quad (9.15)$$

може да се пресмета најмалата стрмнина  $S_{min}$  која ќе предизвика прескок на воздушната изолација:

$$S_{min} = \frac{3000 \cdot s}{Z_{zj} \cdot \tau \cdot (1 - k_{zp})} \quad (9.16)$$

Во исто време амплитудата на струјата на громот мора да биде поголема од вредноста  $I_{min} = S_{min} \cdot \tau$ . Веројатноста на настаните  $I \geq I_{min}$  и  $S \geq S_{min}$ , можеме да ја процениме едноставно со помош на изразот (3.1) и (3.9). Нивниот производ наедно ќе претставува и веројатност за појава на прескок на воздушната изолација во средината од распонот во посматраниот случај. Според тоа добиваме:

$$P_{zj} = e^{-\frac{I_{min}}{26,1}} \cdot e^{-\frac{S_{min}}{15,65}} \quad (9.17)$$

Анализите покажуваат дека кај реалните водови оваа веројатност е безначајно мала во однос на веројатноста за повратен прескок  $P_0$  при удар на гром во столб. Така, на пример, кај растојание  $s = 4$  m и распон  $l = 300$  m, што е типично за еден 110 kV надземен вод, минималната амплитуда и стрмнина на струјата на громот изнесуваат  $I_{min} = 30$  kA и  $S_{min} = 30$  kA/ms, а веројатноста  $P_{zj}$  ќе биде од редот на големина 3-4%. Слично, за растојание  $s = 7$  m и распон  $l = 350$  m, што е типично за еден 220 kV надземен вод, се добива  $P_{zj} = 0,33\%$ . Кај водовите 400 kV оваа веројатност е практично нула.

До сега ја разгледувавме единствено можноста за појава на прескок на воздушната изолација помеѓу заштитното јаже и фазниот спроводник во средината од распонот. Но, во принцип, кај ваквите удари може да дојде и до прескок на изолаторските вериги при самите столбови.

При удар на гром во заштитното јаже во средината од распонот, ефектите од индуцираните напони кај столбот се сосема мали па може да се смета дека напонот на кој ќе биде изложена оваа изолација е практично еднаков на падот на напон  $U_R = R_{st} \cdot i_{st}$  на отпорноста на заземјувачот. Бидејќи струјата во столбот  $i_{st}$  во овој случај е приближно еднаква (дури и нешто помала) од струјата во заштитното јаже  $I_{zj}$ , т.е. една четвртина од струјата на громот, тоа ќе значи дека повратни прескоци на изолаторските вериги ќе треба да се очекуваат само во случаите кога отпорностите на распростирање на заземјувачите од столбовите имаат екстремно високи вредности, од редот на големина 50  $\Omega$  па и повеќе и тоа кај водовите со напон  $U_n \leq 110$  kV.

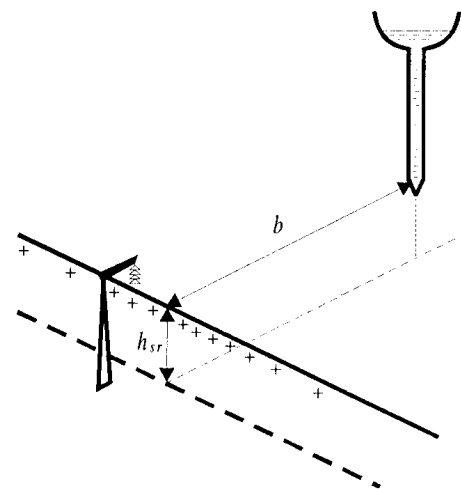
Од изложеното може да се заклучи дека веројатноста за појава на прескок на изолацијата при удари на громот во заштитното јаже во средината од распонот е многу мала,



т.е. занемарлива во споредба со веројатноста за повратен прескок  $P_0$  при удар на громот во самиот столб. Затоа на процесите што настануваат при удари на громот во столбовите од надземните водови и на начинот за определување на веројатноста за повратен прескок  $P_0$  ќе им посветиме најголемо влијание, а ударите во заштитното јаже во средината од распонот ќе ги сметаме за безопасни. Во таа смисла, пак, ударите во заштитното јаже во непосредна близина на столбовите (на растојанија не поголеми од 50 m) предизвикуваат слични ефекти како и директните удари во самите столбови од надземниот вод. Затоа нив ќе можеме, приближно, да ги третираме како "удари" во столбот. Таквите удари се многу поопасни за појавата повратен прескок на изолаторските вериги на столбовите отколку ударите во заштитното јаже кон средината од распонот.

## 9.5. УДАР НА ГРОМ ВО БЛИЗИНА НА НАДЗЕМЕН ВОД

Како што беше образложено во втората глава, според современата претстава на механизмот на атмосферското празење, лидерот на празнењето може да се замисли како тенок спроводен канал кој се спушта од облакот кон земјата (надземниот вод) носејќи најчесто негативни полнежи. Мерењата покажале дека струјата во каналот на лидерот притоа изнесува неколку десетици, па и стотици А. За време на неговото спуштање, коешто се одвива со релативно мала брзина, поради постоењето на капацитивните врски на каналот на лидерот со објектите на земјата, од оддалечените делови на спроводниците од надземниот вод кон местото на ударот почнуваат да се движат позитивни електрични, полнежи компензирајќи го на тој начин негативното електрично поле создадено од негативните полнежи на лидерот (сл. 9.9).



Слика 9.9. Кон појаснувањето на индуцираните електрични полнежи

Кога лидерот ќе го допре местото на ударот започнува обратен процес на движење на позитивни полнежи по каналот на лидерот, оддолу нагоре, со многу поголема брзина  $v$ , блиска до брзината на светлината  $v_0$ , при што е:

$$v = \beta \cdot v_0; (\beta < 1). \quad (9.18)$$

Тој процес се нарекува *главно празнење*.

Од тој момент започнува неутрализација на негативните полнежи во каналот на лидерот и распаѓање на електричното поле создадено од нив. Со тоа позитивните полнежи, индуцирани на спроводниците од надземниот вод престануваат да бидат врзани за полето на лидерот и тие започнуваат да течат по спроводниците на обете страни, лево и десно од местото на ударот, во форма на бранови.

Како резултат на целиот тој сложен електромагнетен процес доаѓа до подигање на потенцијалот на спроводниците, т.е. велиме дека во нив се индуцираат пренапони. Тие пренапони се најголеми на местото на ударот на громот и се должат не само на индуцираните полнежи, создадени од лидерот, туку и на електромагнетското влијание на струјата во каналот на тукушто започнатото главно празнење.

Индуцираните пренапони во надземните водови можат да достигнат големина и од неколку стотини kV, притоа ретко надминувајќи вредност од 300 – 400 kV. Колку е местото на ударот поблиску до надземниот вод, толку тие пренапони ќе бидат поголеми – и обратно.

Тие се најголеми кога атмосферското празнење настанало директно во некој столб од надземниот вод, кога каналот на громот е најблиску до неговите спроводници.

### 9.5.1. Индуцирани пренапони при удар на гром во близина на надземен вод

При негативни празнења во близината на надземен вод спроводникот во однос на столбот добива позитивен потенцијал и напонот на изолацијата  $U_{iz}$ , која претставува разлика на потенцијалите на спроводникот и столбот, има позитивна вредност.

Под претпоставката дека струјата на громот претставува хевисајдов импулс со темена вредност  $I_m$ , може да се покаже дека индуцираниот напонски бран во произволна точка на водот која се наоѓа на доволно големо растојание  $x$  од местото на ударот, има облик опишан со следната релација:

$$u(t) = \frac{60 \cdot I_m \cdot h_{pr.sr}}{b} \cdot \frac{vt/b}{1 + (vt/b)^2}, \quad (\text{kV}). \quad (9.19)$$

Во релацијата (9.19) се воведени следните обележувања:

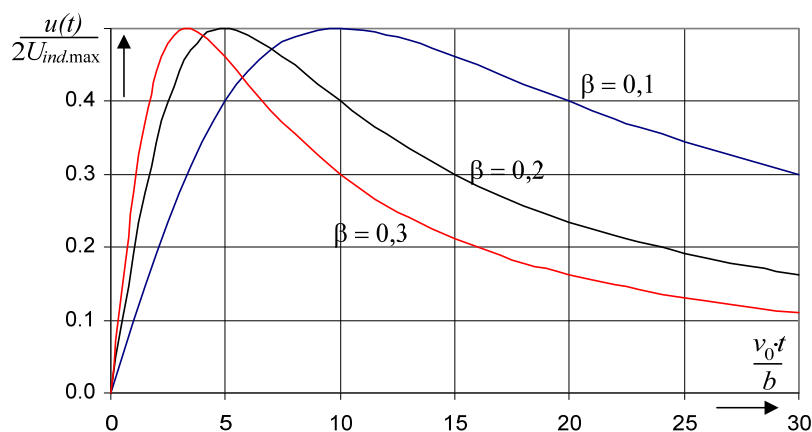
$h_{pr.sr}$  (m) средна висина над земјата на спроводникот во кој се индуцирал пренапонскиот бран;

$b$  (m) нормално растојание од водот до каналот на громот (т.е. местото на ударот);

$I_m$  (kA) амплитуда на струјата на громот.

Релацијата (9.19) е изведена тргнувајќи од основните Максвелови равенки за електро-динамичките потенцијали во задоцнување при што со  $t = 0$  е означен моментот кога во посматраната точка започнува да се чувствува влијанието на електромагнетното поле на главното празнење. Со други зборови процесите во точката  $x$  доцнат зад процесите на местото на ударот за време  $\tau_x = x/v_0$  кое е наедно и време на простирање на електромагнетскиот сигнал од местото на ударот на громот до посматраната точка  $x$ .

Покрај тоа може да се докаже, исто така, дека за точки  $x$  што се наоѓаат на доволно растојание од местото на ударот обликот на бранот како и неговата амплитуда практично не зависат од обликот на струјата на громот, туку, како што може да се види од дијаграмот од сликата 9.10, обликот на индуцираниот бран практично зависи само од брзината  $v$  на главното (обратното) празнење, т.е. од параметарот  $\beta = v/v_0$ .



Слика 9.10. Облик на индуцираниот пренапонски бран во зависност од  $\beta$  и  $v_0 t/b$

Од сликата 9.10 може да се заклучи дека максималната вредност на индуцираниот напон  $U_{ind.max}$  не зависи од параметарот  $\beta$  туку таа зависи од амплитудата на струјата  $I_m$ , од средната височина  $h_{pr.sr}$  и од растојанието  $b$ . Од (9.10) произлегува дека амплитудата на индуцираниот бран изнесува:

$$U_{ind.max} = \frac{30 \cdot I_m \cdot h_{pr.sr}}{b}, \text{ (kV)}. \quad (9.20)$$

Тргувајќи од условот  $du/dt = 0$ , применет на изразот (9.19) се добива и моментот  $t_m$  кога индуцираниот напон  $u(t)$  ја достигнува својата максимална вредност:

$$t_m = \frac{b}{v} = \frac{b}{\beta \cdot v_0} = \frac{\tau_x}{\beta}. \quad (9.21)$$

**Пример 9.1.** Да се пресмета колкава треба да биде најмалата вредност на амплитудата на струјата на громот  $I_m$  која ќе предизвика прескок на изолацијата од еден 20 kV надземен вод при удар на гром на растојание  $b = 100$  m од водот. Импулсната цврстина на изолацијата изнесува  $U_{50\%} = 125$  kV, а средната височина на фазните спроводници над земјата изнесува  $h_{pr.sr} = 8$  m. Колкава е веројатноста  $P_{pr}$  удар на громот во земјата на тоа растојание да предизвика прескок на изолацијата од посматраниот вод.

**Решение:**

Бараната амплитуда на струјата на громот ќе ја поресметаме со помош на релацијата (9.20):

$$U_{50\%} = \frac{30 \cdot I_m \cdot h_{pr.sr}}{b} \Rightarrow I_m = \frac{b \cdot U_{50\%}}{30 \cdot h_{pr.sr}} = \frac{100 \cdot 125}{30 \cdot 8} = 52,1 \text{ kA}.$$

Бараната веројатност за прескок  $P_{pr}$  ќе изнесува:

$$P_{pr} = P(I > I_m) = \exp\left(-\frac{I_m}{26,1}\right) = \exp\left(-\frac{52,1}{26,1}\right) = 0,136.$$

Притоа за пресметка на бараната веројатност  $P_{pr}$  е користена експоненцијалната формула (3.1). Доколку за таа цел се примени формулата (3.13) според IEEE – моделот, тогаш ќе се добиеше:

$$P_{pr} = P(I > I_m) = \frac{1}{1 + (I_m / 31)^{2,6}} = \frac{1}{1 + (52,1 / 31)^{2,6}} = 0,206.$$

## 9.6. ПРЕНАПОНИ ПРИ ДИРЕКТЕН УДАР НА ГРОМ ВО СТОЛБ ОД НАДЗЕМЕН ВОД

За поедноставно анализирање на пренапоните што се јавуваат при ударите на гром во столб или во заштитното јаже во близина на столб, индуцираните пренапони во спроводниците од надземните водови под дејство на електромагнетското влијание на каналот на громот, за кои што се зборуваше во претходната точка, ќе ги разложиме (декомпонираме) на две компоненти – електрична и магнетна.

### а) **Електрична компонента на индуцираните пренапони**

Електричната компонента на индуцираните пренапони се должи на течењето на ослободените полнежи коишто биле индуцирани на спроводниците од водот во фазата на спуштањето на лидерот на громот, пред почетокот на главното празнење. Значи тие се јавуваат веднаш после ударот на лидерот, со почетокот на процесот на главното празнење, кога ослободените полнежи во форма на бранови започнуваат да се движат по спроводниците, лево и десно од местото на ударот.

Ќе го разгледаме најнапред случајот кога надземниот вод нема заштитно јаже, како поедноставен за анализа. Притоа ќе претпоставиме дека струјата на громот (т.е. струјата на главното празнење) во форма на косоаголен бран се движи нагоре по каналот на громот со константна брзина  $v = \beta \cdot v_0$ . Анализите на оваа појава покажуваат дека во таквиот случај временскиот тек на електричната компонента  $U_{i.e}(t)$  на индуцираниот напон може да се пресмета со помош на следната релација:

$$U_{i.e}(t) = \frac{0,1 \cdot S \cdot h_{pr}}{\beta} \cdot \ln \frac{(v \cdot t + h_{pr}) \cdot \sqrt{(v \cdot t + \Delta h)(v \cdot t + H)}}{(1 + \beta)^2 \cdot h_{st} \cdot \sqrt{H \cdot \Delta h}} \quad (9.22)$$

Во последната релација се воведени следните обележувања:

$S$  - стрмина на струјата на громот ( $S = dI_g/dt$ );

$h_{pr}$  - височина на обесување на спроводникот;

$h_{st}$  - височина на столбот во кој настанал ударот;

$v_0$  - брзина на светлината во воздух/вакуум ( $v_0 = 300.000 \text{ km/s} = 300 \text{ m}/\mu\text{s}$ );

$v$  - брзина на движење на струјата на главното празнење ( $v = \beta \cdot v_0$ );

$\beta$  - релативна брзина на распростирање на главното празнење. Таа се движи во границите  $0,1 \leq \beta \leq 0,5$ , но најчесто се усвојува  $\beta = 0,3$ ;

$$H = h_{st} + h_{pr};$$

$$\Delta h = h_{st} - h_{pr}.$$

Доколку посматраниот надземен вод е заштитен со земјоводно јаже, тогаш и на јажето ќе се одвиваат истите гореспоменати процеси. Значи, во лидерниот стадиум на јажето ќе се индуцираат електрични полнежи кои подоцна, во стадиумот на главното празнење, кога ќе бидат ослободени, во форма на бранови ќе се движат по јажето во две спротивни насоки. Анализите покажуваат дека простирањето на овие бранови по јажето ќе ја намалат индуцираната електрична компонента во спроводниците и во тој случај таа ќе треба да се пресметува со помош на изразот (9.23).

$$U'_{i.e} = U_{i.e}(t) \cdot \left(1 - k_{zp} \frac{h_{zj}}{h_{pr}}\right)$$

$$U'_{i.e} = \frac{0,1 \cdot S \cdot h_{pr}}{\beta} \cdot \ln \frac{(v \cdot t + h_{pr}) \cdot \sqrt{(v \cdot t + \Delta h)(v \cdot t + H)}}{(1 + \beta)^2 \cdot h_{st} \cdot \sqrt{H \cdot \Delta h}} \cdot \left(1 - k_{zp} \frac{h_{zj}}{h_{pr}}\right) \quad (9.23)$$

каде што  $h_{zj}$  е височина на обесување на заштитното јаже, додека  $k_{zp}$  е т.н. *коэффициент на спрега* помеѓу заштитното јаже и спроводникот.

За случајот кога водот има само едно заштитно јаже овој коэффициент се пресметува со помош на релацијата (9.24):

$$k_{zp} = \frac{Z_{12}}{Z_{11}}, \quad (9.24)$$

во која се воведени следните обележувања:

$$Z_{11} = 60 \cdot \ln \frac{4h_{zj.sr}}{d_{11}}; \quad Z_{12} = 60 \cdot \ln \frac{D_{12}}{d_{12}} \quad (9.25)$$

$h_{zj.sr}$  - просечна висина над земјата на заштитното јаже;

$d_{11}$ ,  $d_{12}$ ,  $D_{12}$  - пречник на заштитното јаже, растојание помеѓу заштитното јаже и спроводникот и растојание помеѓу ликот на заштитно јаже и спроводникот.

Кога се работи за вод со две заштитни јажиња, обележени со броевите 1 и 2, додека спроводникот е обележен со бројот 3, коэффициентот  $k_{zp}$  се пресметува со помош на (9.26):

$$k_{zp} = \frac{Z_{13} + Z_{23}}{Z_{11} + Z_{22}} \quad (9.26)$$

во која се воведени следните обележувања:

$$Z_{11} = 60 \cdot \ln \frac{4h_{zj1.sr}}{d_{11}}; \quad Z_{22} = 60 \cdot \ln \frac{4h_{zj2.sr}}{d_{22}}; \quad (9.27)$$

$$Z_{13} = 60 \cdot \ln \frac{D_{13}}{d_{13}}; \quad Z_{23} = 60 \cdot \ln \frac{D_{23}}{d_{23}}$$

$h_{zj1.sr}$ ,  $h_{zj2.sr}$  - просечна висина над земјата на првото, односно второто заштитно јаже;

$d_{11}$ ,  $d_{22}$  - пречник на првото, односно второто заштитно јаже;

$d_{13}$  - растојание помеѓу првото заштитното јаже и спроводникот;

$d_{23}$  - растојание помеѓу второто заштитното јаже и спроводникот;

$D_{13}$  - растојание помеѓу ликот од првото заштитно јаже и спроводникот;

$D_{23}$  - растојание помеѓу ликот од второто заштитно јаже и спроводникот;

Во релациите (9.24) и (9.25) со  $Z_{11}$  е означена брановата импеданција на заштитното јаже, додека со  $Z_{12}$  е означена меѓусебната бранова импеданција помеѓу заштиното јаже и фазниот спроводник. Во релациите (9.26) и (9.27) со  $Z_{11}$  и со  $Z_{22}$  се означени брановите импеданции на првото, односно второто заштитно јаже, додека со  $Z_{13}$  и  $Z_{23}$  се означени меѓусебната бранова импеданција помеѓу првото заштиното јаже и фазниот спроводник, односно второто заштиното јаже и фазниот спроводник – респективно.

## б) Магнетна компонента на индуцираните пренапони

Магнетната компонента на индуцираниот напон  $U_{i.m}(t)$  во фазните спроводници не влијае врз текот на преодните процеси предизвикани во импулсниот период од струјата на атмосферското празнење. Таа се должи на постоењето на променливото надворешното магнетско поле создадено од струите  $i_{st}$  и  $i_g$  што течат во столбот и во каналот на громот кое во контурата фазен спроводник – земја индуцираат емс. Условно се состои од два дела кои имаат ист ред на големина. Првиот дел од магнетната компонента е пропорционален на брзината на промена на струјата  $i_{st}$ , додека вториот дел е пропорционален на брзината на промена на струјата  $i_g$  во каналот на главното празнење:

$$U_{i.m}(t) = L_{st}^{pr} \cdot \frac{di_{st}}{dt} + M_{pr}(t) \cdot \frac{di_g}{dt} \quad (9.28)$$

каде што е:

$L_{st}^{pr}$  индуктивност на делот од столбот од површината на земјата до висината на обесување на спроводникот;

$M_{pr}(t)$  заемна индуктивност помеѓу каналот на громот и контурата спроводник–земја;

$i_{st}$  струја во столбот, која се одведува преку неговиот заземјувач во земјата;

$i_g$  струја во каналот на громот.

Индуктивноста  $L_{st}^{pr}$ , изразена во  $\mu\text{H}$ , се пресметува со помош на следниот израз:

$$L_{st}^{pr} = 0,2 \cdot h_{pr} \cdot \left( \ln \frac{2H}{r_{ek}} + \frac{\Delta h}{2 \cdot h_{pr}} \cdot \ln \frac{H}{\Delta h} - 1 \right) \approx 0,6 \cdot h_{pr} \quad (9.29)$$

кадешто  $r_{ek}$  е т.н. еквивалентен радиус на столбот, т.е. радиус на цилиндерот со кој е можно столбот да се еквивалентира при анализите на преодните процеси во импулсниот период.

Радиусот  $r_{ek}$  се добива од условот површината на еквивалентниот круг да биде еднаква со површината на основата на столбот, т.е.

$$r_{ek} = \sqrt{\frac{a_{st} \cdot b_{st}}{\pi}} \quad (9.30)$$

каде  $a_{st}$  и  $b_{st}$  е должините на страниците на основата од столбот. Како што се гледа, големината на индуктивноста  $L_{st}^{pr}$  е пропорционална на висината  $h_{pr}$ . Анализите покажуваат дека подолжната индуктивност  $L_{st}^{pr} = L_{st}^{pr} / h_{pr}$  на најчесто користените столбови се движи во границите од 0,55 до 0,65  $\mu\text{H}/\text{km}$ .

Заемната индуктивност помеѓу каналот на громот и контурата спроводник–земја  $M_{pr}(t)$  е временски променлива бидејќи должината на каналот на громот е променлива и расте со брзина  $v = \beta \cdot v_0$ . Неа можеме да ја пресметаме со помош на следната формула:

$$M_{pr}(t) = 0,2 \cdot h_{pr} \cdot \left( \ln \frac{v \cdot t + H}{(1 + \beta) \cdot H} - \frac{\Delta h}{2h_{pr}} \cdot \ln \frac{H}{\Delta h} + 1 \right) \quad (9.31)$$

### в) Индуциран напон во спроводникот под дејство на струјата во заштитното јаже

За време на преодниот процес предизвикан од атмосферското празнење дел од струјата на громот ќе тече и низ заштитното јаже. Бидејќи овде се зборува за идеализиран, симетричен, модел, тука ќе се работи за две еднакви струи  $i_{zj1} = i_{zj2} = 0,5 \cdot I_{zj}$ , од која едната тече во заштитното јаже во левиот распон, додека другата тече во заштитното јаже во десниот распон, како што е тоа прикажано на сликата 9.7. На тој начин, бидејќи овие две струи се исти, можеме да зборуваме само за една струја во заштитното јаже  $i_{zj} = I_{zj}$ .

Индуцираниот напон што се јавува во фазниот спроводник под дејство на струјата во заштитното јаже  $i_{zj}$  ќе биде пропорционален на оваа струја, т.е. тој зависи од струјата  $i_{zj}$  и коефициентот на заемна спрега помеѓу заштитното јаже и спроводникот  $k_{zp}$ . Се пресметува со помош на изразот (9.32):

$$U_{i.zj}(t) = k_{zp} \cdot U_{st}(t) \quad (9.32)$$

каде што коефициентот на спрега  $k_{zp}$  се пресметува според (9.24) додека импеданцијата на заштитното јаже  $Z_{zj}$  се пресметува според првиот израз од (9.25).

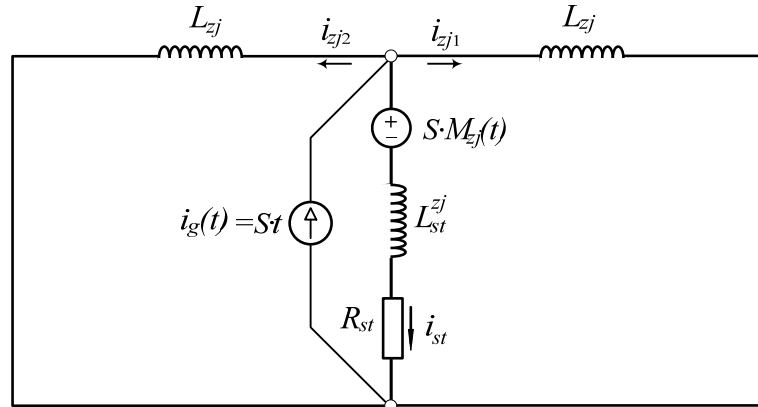
Овој индуциран напон ќе има знак обратен од знакот на останатите индуцирани напони бидејќи струјата  $i_{zj}$ , која тече во насока од погодениот столб кон соседните, со своето дејство ја смалува вредноста на потенцијалот на спроводникот, а со тоа ќе го смалува и напонот што ја напрега изолацијата.

## 9.5.2. Временски тек на преодниот процес во импулсен период

Решавањето на преодниот процес во импулсниот период, т.е. определување на временските зависимости  $i_{st}(t)$ ,  $i_{zj}(t)$ ,  $U_{st}(t)$  и др. е можно да се изврши на повеќе начини. Еден од начините е, на пример, директното решавање на преодниот процес во временски домен, уважувајќи го автентично брановиот карактер на процесот. Ваквиот пристап е можен само доколку пресметките се прават на компјутер, со специјални програми, направени само за таа цел.

Другиот начин за пресметка на преодниот процес, кој ќе биде презентираан овде, е приближен но е затоа значително поедноставен. Иако е приближен, тој е сосема погоден за инженерски пресметувања. Според него, столбот како и заштитните јажиња, кои во импулсниот период се владеат како водови со распределени параметри, се претставуваат со своите индуктивности, т.е. се претвораат во елементи со концентрирани параметри, занемарувајќи ја притоа нивната капацитивност спрема земјата. Понатаму, посматраниот проблем се идеализира и се посматра симетричен случај кога соседните распони на

посматраниот столб имаат иста должина, занемарувајќи го притоа постоењето на преостанатите распони од далекуводот. На тој начин се добива едно просто електрично коло, составено само од индуктивности и активни отпорности, во кое дејствува струјниот генератор со кој се моделира струјата на главното празнење и една индуцирана емс во столбот, создадена од струјата во заштитното јаже (сл. 9.11).



Слика 9.11. Модел за решавање на преодниот процес при директен удар на гром во столб

Во тој случај решавањето на проблемот се сведува на решавање на преодниот процес во едно просто линеарно електрично коло со концентрирани параметри, коешто може да се изврши и директно, дури и без примена на компјутер.

**а) Пресметка на струите и напоните во импулсниот период**

Според вториов, упростен, модел, временските текови на струјата во столбот  $i_{st}(t)$  и на напонот на столбот  $U_{st}(t)$ , во периодот на челото, може да се пресметаат со помош на следните релации:

$$i_{st}(t) = S \cdot \left( 1 - \frac{L_{st}^{zj} + M_{zj}(t)}{0,5 \cdot L_{zj} + L_{st}^{zj}} \right) \cdot \frac{1 - e^{-\alpha t}}{\alpha} \quad (9.33)$$

$$U_{st}(t) = R_{st} \cdot i_{st} + L_{st}^{zj} \cdot \frac{di_{st}}{dt} + S \cdot M_{zj}(t) \quad (9.34)$$

каде што е:

$L_{st}^{zj}$  - вкупна индуктивност на столбот, од неговата основа до неговиот врв, која може да се пресмета со помош на изразот (5.13);

$$L_{st}^{zj} = 0,2 \cdot h_{st} \cdot \left( \ln \frac{4h_{st}}{r_{ek}} - 1 \right) \quad (9.35)$$

$M_{zj}(t)$  - заемна индуктивност помеѓу каналот на громот и контурата заштитно јаже–земја, со која се зема предвид емс индуцирана во заштитното јаже под дејство на струјата во каналот на громот. Оваа заемна индуктивност, слично како и заемната индуктивност  $M_{pr}(t)$ , поради променливата должина на каналот на громот, е исто така временски променлива и може да се пресмета со помош на релацијата (9.36);

$$M_{zj}(t) = 0,2 \cdot h_{st} \cdot \left( \ln \frac{v \cdot t + 2h_{st}}{(1 + \beta) \cdot 2h_{st}} + 1 \right) \quad (9.36)$$

$L_{zj}$  - индуктивност на заштитното јаже со должина еднаква на должината на соседниот распон која, изразена во  $\mu\text{H}$ , се пресметува со помош на релацијата (9.37);

$$L_{zj} = \frac{Z_{zj}}{v_0} \cdot l = \frac{Z_{zj}}{300} \cdot l \quad (9.37)$$

каде што  $l$  е должина на распонот, додека  $Z_{zj}$  е бранова импеданција на заштитното јаже (без уважување на ефектот корона), која се пресметува со помош на следната релација:

$$Z_{zj} = 60 \cdot \ln \frac{4h_{zj.sr}}{d_{zj}} \quad (9.38)$$

и во која со  $h_{zj.sr}$  е означена средната (просечна) висина на заштитното јаже над земјата, додека  $d_{zj}$  е пречник на заштитното јаже;

$R_{st}$  - отпорност (импулсна) на распростирање на заземјувачот на столбот;

$$\alpha = \frac{R_{st}}{0,5 \cdot L_{zj} + L_{st}^{zj}} \quad (9.39)$$

Врз основа на (9.33) лесно може да се пресмета изводот на струјата во столбот, кој ќе биде потребен за натамошните пресметки:

$$\frac{di_{st}(t)}{dt} = S \cdot \left( 1 - \frac{L_{st}^{zj} + M_{zj}(t)}{0,5 \cdot L_{zj} + L_{st}^{zj}} \right) \cdot e^{-\alpha t} \quad (9.40)$$

Имајќи ја предвид релацијата:

$$i_{zj1}(t) = i_{zj2}(t) = i_{zj}(t) / 2 \quad (9.41)$$

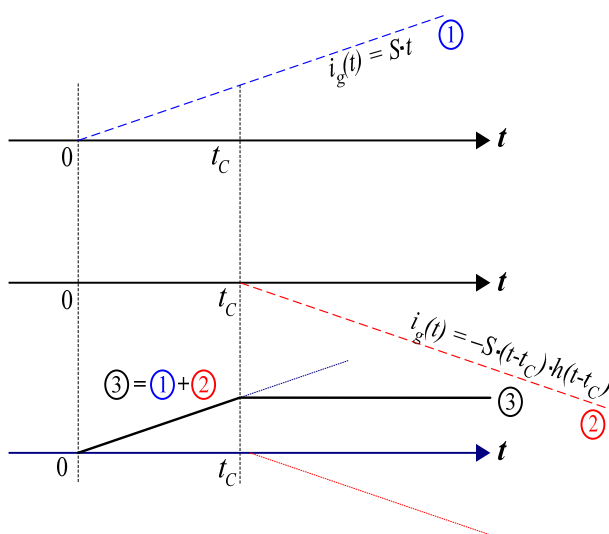
врз основа на сликата 9.11, со примена на I Кирхофов закон, за струјата во заштитното јаже може да се пишува:

$$i_{zj}(t) = i_g(t) - i_{st}(t) = S \cdot t - i_{st}(t) \quad (9.42)$$

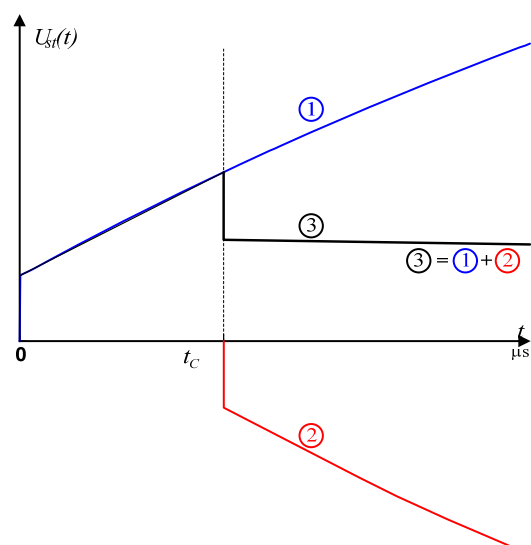
### б) Облик на кривата на напонот $U_{st}(t)$

Со помош на моделот од точката 9.5.2 се пресметува временскиот тек на напоните и струите на столбот  $U_{st}(t)$  и  $i_{st}(t)$  под претпоставката дека акцијата, т.е. во случајов струјата на громот  $i_g(t)$  претставува линеарно растечка функција со облик:

$$i_g(t) = S \cdot t \quad (9.43)$$



а) "Акција" во колото



б) Одзив во колото  $U_{st}(t)$

Слика 9.12. Примена на принципот на суперпозиција за добивање на целосното решение



Значи изведените изрази за временските функции  $U_{st}(t)$  и  $i_{st}(t)$  важат само во периодот на челото на струјниот импулс. Доколку претпоставиме дека струјата на громот има линеарно чело и константен грб, тогаш на база на тие изрази и со примена на принципот на суперпозиција, ќе може да се добијат и изразите за променливите  $U_{st}(t)$  и  $i_{st}(t)$  и во периодот по завршувањето на челото. Во тој случај обликот на струјата на громот  $i_g(t)$  ќе можеме да го претставиме со помош на изразот (9.44), како збир (суперпозиција) од две временски изместени акции, како што е тоа прикажано на сликата 9.12а. Бидејќи е системот е линеарен тоа ќе значи дека и сумарниот одзив во колото т.е. променливите  $U_{st}(t)$  и  $i_{st}(t)$  ќе може да ги добиеме како збир од парцијалните одзиви на колото (кои што се исто така временски изместени за времето на челото  $t_c$ ), за првата, односно втората, акција, како што е тоа прикажано на сликата 9.12б.

### в) Пресметка на напонот на изолацијата

Напонот на краевите на изолацијата за време на преодниот процес ќе се добие како разлика од потенцијалите на спроводникот и конзолата (столбот), при што ќе бидат уважени сите споменати индуцирани напони во самиот спроводник  $U_{i.e}(t)$ ,  $U_{i.m}(t)$  и  $U_{i.zj}(t)$ , земени со соодветен предзнак. Покрај ова, за пресметка на напонот на изолацијата ќе треба да бидат замени предвид уште две компоненти - падот на напон на отпорноста на распростирање на столбот  $U_R = R_{st} \cdot i_{st}$  и влијанието на погонскиот напон  $U_P$ .

Работниот напон на фазниот спроводник се менува по синусен закон и зависно од моментот на настанатото атмосферско празнење, може да има различни вредности, било позитивни, било негативни. Меѓутоа во трифазните системи, во секој момент барем една од фазите ќе има потенцијал кој со својот знак се совпаѓа со поларитетот на импулсното празнење на громот. Затоа во ваквиот вид пресметки се препорачува за работниот напон да се земе просечната моментална вредност од напонот во едната полупериода, која според наводи во литературата изнесува:

$$U_P = 0,675 \cdot U_n \quad (9.45)$$

каде  $U_n$  е ефективната вредност на номиналниот меѓуфазен напон.

Според тоа, за напонот кој ја напрега изолацијата на посматраната фаза за време на атмосферското празнење може да се пишува:

$$U_{iz}(t) = R_{st} \cdot i_{st} + [U'_{ie}(t) + U_{im}(t) - U_{i.zj}(t)] + U_P \quad (9.46)$$

или со оглед на погоре изведените изрази, добиваме:

$$U_{iz}(t) = R_{st} \cdot i_{st} + U_{i.e}(t) \cdot (1 - k_{zp} \cdot \frac{h_{zj}}{h_{pr}}) + L_{st}^{pr} \cdot \frac{di_{st}}{dt} + M_{pr}(t) \cdot S - k_{zp} \cdot U_{st}(t) + U_P \quad (9.47)$$

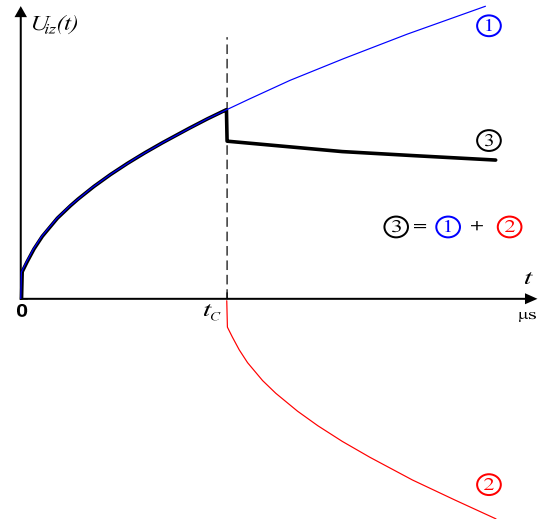
На тој начин се добива целосниот временски тек на кривата на напонот  $U_{iz}(t)$  што ја напрега изолацијата во периодот на челото. Вкупниот временски тек на напонот  $U_{iz}(t)$  ќе го добиеме, како и во претходниот случај, повторно со примена на принципот на суперпозиција, на тој начин што на кривата  $U_{iz}(t) \cdot h(t)$  ќе ја суперпонираме кривата  $U_{iz}(t-t_c) \cdot h(t-t_c)$ . Графичката постапка за добивањето на целосниот временски тек на кривата  $U_{iz}(t)$  е прикажан на сликата 9.13.

Од сликата 9.13 се гледа дека најголемата вредност на напонот на изолацијата, кој што е меродавен за тоа дали ќе дојде до повратен прескок или не, се постигнува во моментот  $t = t_c$ . После тој момент напонот на изолацијата нагло паѓа на вредноста  $U_{iz} = R_{st} \cdot I_m$  и понатаму продолжува да опаѓа но со позабрзано темпо од она што е прикажано на сликата 9.12 бидејќи струјата на громот во периодот на грбот не е константа, како во случајот прикажан на сликата 9.13 туку опаѓа. Затоа е мала веројатноста до прескок да дојде во периодот  $t > t_c$ .

### 9.5.3. Пресметување на кривата на опасни параметри

Пресметката на веројатноста  $P_0$  за појава на повратен прескок при директно атмосферско празнење во столбот ќе го извршиме со примена на т.н. *метод на опасни параметри*.

За таа цел ќе биде потребно за посматраниот столб да ја формираме *кривата на опасни параметри*. Оваа крива го дели првиот квадрант од координатниот систем I-S на две области, т.е. ја дефинира т.н. *област на опасни параметри*. Областа на опасни параметри претставува зона на парови ( $I, S$ ) на параметрите на громот кои предизвикуваат повратен прескок.



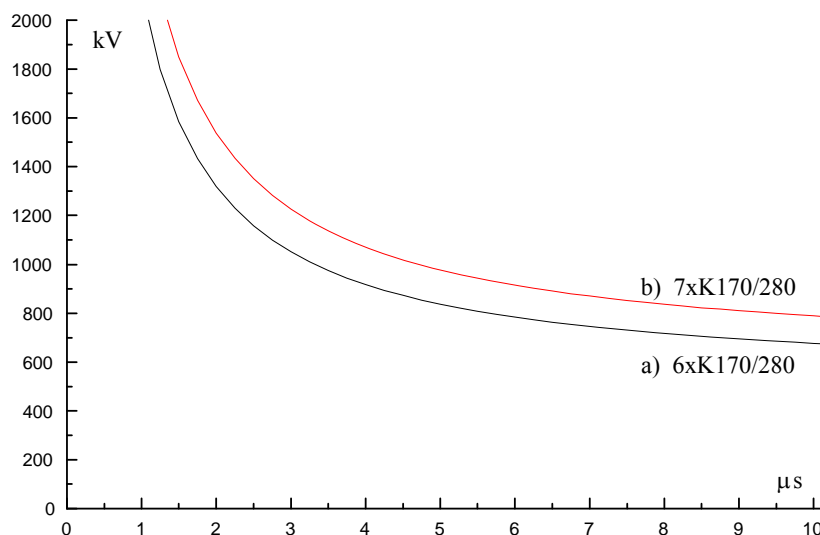
Слика 9.13. Целосен изглед на кривата на напонот  $U_{iz}(t)$  при удар во столб

#### а) Волтсекундна карактеристика на изолацијата

Волтсекундната карактеристика на изолацијата  $U_{V-s}(t)$  ја дава зависноста на 50% прескочен напон на изолацијата од времето на дејствување на импулсниот напон. Обликот на оваа карактеристика, во принцип, се определува експериментално. Во недостаток на експериментално добиени податоци може да се користат проценки добиени со помош на некоја емпириска формула, какви што се, на пример, изразите (5.25) и (5.27), изложени во петтата глава, или овде прикажаната релација (9.48).

$$U_{V-s}(t) = 506,8 \cdot L_{iz} \cdot \left(1 + \frac{3,1}{t}\right) \quad (9.48)$$

Во оваа релација со  $L_{iz}$  (m) е означено меѓуелектродното растојание на изолаторската верига. На сликата 9.14 е прикажана V-s карактеристика на една 110 kV изолаторска верига составена од капасти изолатори од типот K170/280, пресметана со помош на изразот (9.48)



Слика 9.14. Волтсекундна карактеристика на изолаторска верига за 110 kV напон, добиена според (9.43) со 6 и 7 изолатори тип K170/280

## б) **Формирање на кривата на опасни параметри**

Пресметувањето на кривата на опасни параметри на еден столб се врши со повеќекратно споредување и изнаоѓање на пресечната точка на кривата  $U_{iz}(t)$  на напонот на изолацијата што се добива при дејство на косоаголен струен бран на громот со зададена стрмнина  $S$  со волтсекундната карактеристика на самата изолација (сл. 9.15). За таа цел како најпогодна се покажала следната постапка.

Најнапред, со помош на моделот изложен во точката 9.5.2 и релацијата (9.47) се формира кривата  $\varphi(t)$ , дефинирана на следниот начин:

$$\varphi(t) = \frac{U_{iz}(t) - U_p}{S} \quad (9.49)$$

т.е. се определува временскиот тек на напонот на изолацијата за единечна стрмнина  $S = 1$ . Потоа за секоја друга стрмнина на струјата на громот  $S$ , поради линеарниот карактер на моделот, временскиот тек  $U_{iz}(t)$  на напонот на изолацијата лесно ќе се определи со помош на релацијата (9.49а):

$$U_{iz}(t) = S \cdot \varphi(t) + U_p. \quad (9.49a)$$

На сликата 9.15, покрај волтсекундната карактеристика на изолацијата, прикажани се и три криви на промена на напонот на изолацијата за три различни вредности на стрмнината  $S$  на косоаголниот бран на струјата на громот  $S = s_1, s_2$  и  $s_3$ .

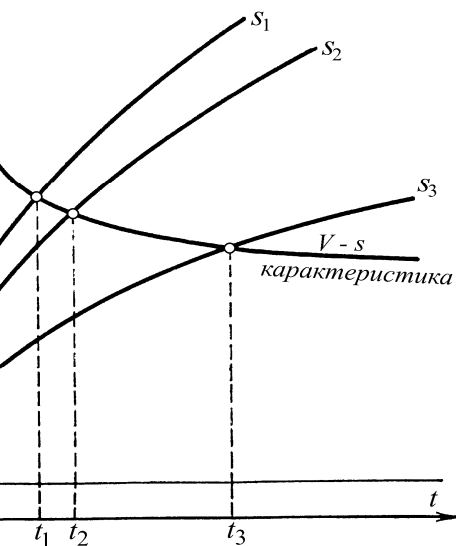
Како што се гледа на самата слика, пресекот на волтсекундната карактеристика на изолацијата со кривата  $U_{iz}(t)$  добиена за стрмнината  $S = a_1$  ќе го определи времето  $t_1$  и соодветно, амплитудата на струјата на громот  $I_1 = s_1 \cdot t_1$  при кои ќе дојде до прескок на изолацијата. На тој начин добиваме една точка од кривата на опасни параметри, т.е. еден пар  $(I_1, s_1)$  кој припаѓа на кривата на опасни параметри. Оваа постапка ја повторуваме повеќе пати, со различни вредности на стрмнината  $S$  и на тој начин го добиваме множеството точки кое ја дефинира бараната крива на опасни параметри.

Типичниот облик на кривата на опасни параметри е прикажан на сликата 9.16.

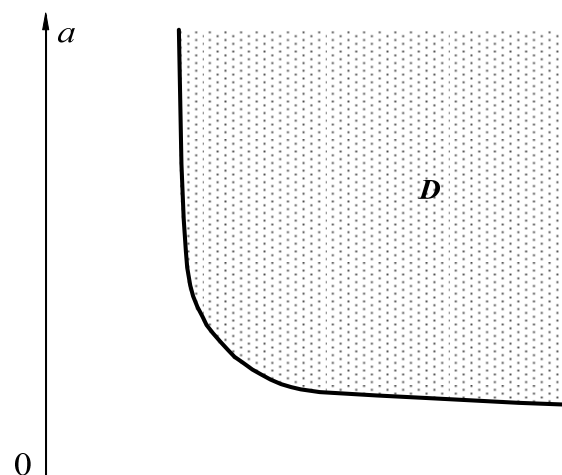
Од самата дефиниција на кривата на опасни параметри произлегува дека сите удари на громот кои ќе имаат параметри  $(I, S)$  што се наоѓаат на десната страна од оваа крива (сл. 9.16) ќе предизвикуваат прескок на изолацијата, додека преостанатите удари, чии параметри лежат лево од оваа крива ќе бидат безопасни. Оттука произлегува и постапката за определување на веројатноста  $P_0$  за повратен прескок:

$$P_0 = \iint_D p(I, S) \cdot dI \cdot dS \quad (9.50)$$

кадешто  $D$  е областа десно од кривата на опасни параметри.



а 9.15. Волтсекундна карактеристика на изолацијата и криви на промена на напонот



Слика 9.16. Облик на кривата на опасни параметри на еден столб

в) **Пресметка на веројатноста за повратен прескок  $P_0$**

Од самата дефиниција на кривата на опасни параметри произлегува дека сите удари на громот кои ќе имаат параметри  $(I_m, S)$  што се наоѓаат на десната страна од оваа крива (сл. 9.16) ќе предизвикуваат прескок на изолацијата, додека преостанатите удари, чии параметри лежат лево од оваа крива ќе бидат безопасни. Оттука произлегува и постапката за определување на веројатноста  $P_0$  за повратен прескок:

$$P_0 = \iint_D p(I, S) \cdot dI \cdot dS \quad (9.50)$$

кадешто  $D$  е областа десно од кривата на опасни параметри.

**Случај кога параметрите на громот се независни случајни големини**

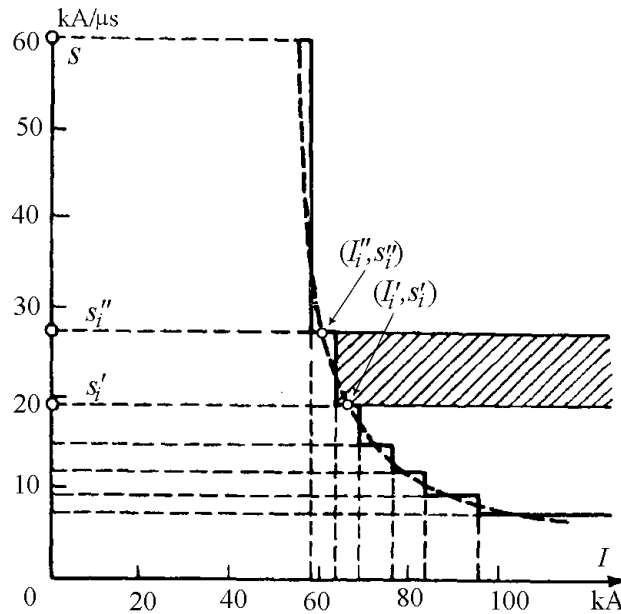
Во советската литература како и во инженерската практика најчесто се применува постапка која базира на претпоставката дека амплитудата  $I$  и стрмнината на струјата на громот  $S$  се две независни случајни величини. Иако ваквата претпоставка не е сосема коректна и секогаш дава нешто помали вредности за веројатноста  $P_0$  од вистинските, сепак заради својата едноставност, таа се користи многу често. Овде ќе биде изложен начин за пресметување на веројатноста  $P_0$  кој базира на претпоставката за независноста на параметрите на струјата на громот.

Решавањето на интегралот (9.50) е најзгодно да се врши нумерички. За таа цел, областа  $D$  ограничена со кривата на опасни параметри ќе ја поделиме на поголем број елементарни површини, ограничени помеѓу две доволно блиски стрмнини  $s_i''$  и  $s_i'$ , на кои на кривата на опасни параметри им одговараат две соседни вредности на амплитудата на струјата на громот  $I_i''$  и  $I_i'$  (слика 9.17). Во тој случај, ако со  $I_i$  ја означиме средната вредност од овие две соседни амплитуди, т.е.

$$I_i = \frac{I_i' + I_i''}{2} \quad (9.51)$$

тогаш со помош на изразот (9.52) ќе ја добиеме приближната вредност на интегралот (9.46) по нумерички пат:

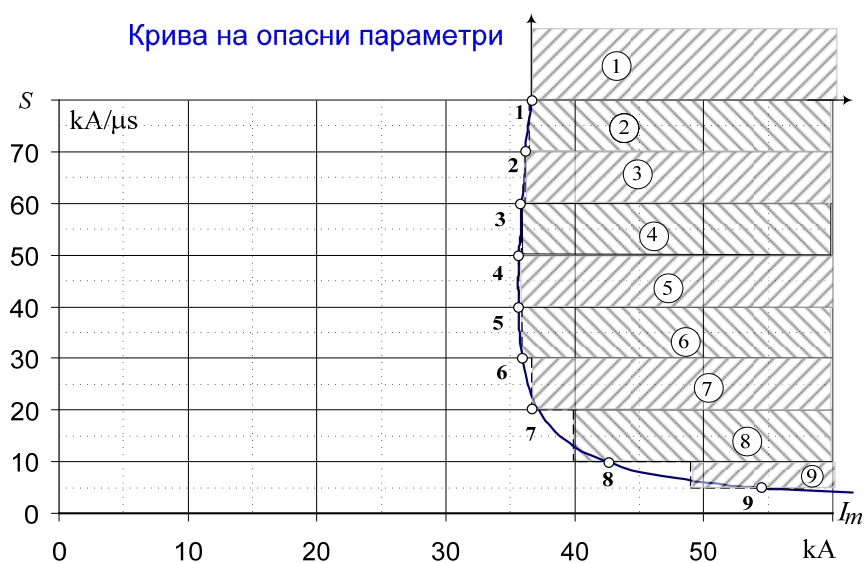
$$P_0 \approx \sum_i P(I \geq I_i) \cdot P(s_i' \leq s < s_i'') \cdot (s_i'' - s_i') = \sum_i e^{-\frac{I_i}{26,1}} \cdot \left( e^{-\frac{s_i'}{10,9}} - e^{-\frac{s_i''}{10,9}} \right) \cdot (s_i'' - s_i') \quad (9.52)$$



**Слика 9.17. Пресметка на веројатноста за повратен прескок со помош на кривата на опасни параметри**

Примената на оваа постапка е особено погодна во случаите кога распределбата на параметрите на громот подлежат на експоненцијалниот закон, според моделите (3.1) и (3.13), како и во случајот кога се применува т.н. IEEE-модел (3.11).

**Пример.** На сликата П.1 е прикажана „кривата на опасни параметри“ за еден столб од 110 kV надземен вод, пресметана со помош на програмата „Udar vo stolb.xls“. Координатите на одделните точки, означени на сликата, се дадени во следната табела.



**Слика П.1. Крива на опасни параметри на набљудуваниот столб**

Табела П.1. Табеларен приказ на кривата на опасни параметри

п.бр.	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$I$ (kA)	36.6 6	36.1 9	35.8 4	35.6 7	35.6 1	35.9 0	37.1 9	42.4 1	54.3 9
$S$ (kA/ $\mu$ s)	80.0	70.0	60.0	50.0	40.0	30.0	20.0	10.0	5.0

Со помош на изразот за приближно интегрирање (9.52) да се пресмета веројатноста за повратен прескок  $P_0$  за овој столб.

### Решение:

Веројатноста за повратен прескок на столбот  $P_0$  ќе ја добиеме како збир од веројатностите  $p_1, p_2, p_3, \dots, p_9$  параметрите на громот ( $I, S$ ) да добијат вредности што припаѓаат на обласите означени на сликата П.1. со 1, 2, 3, ... и 9. Според тоа ќе имаме:

$$p_1 = P(I \geq I_1) \cdot P(S \geq S_1) = e^{-\frac{I_1}{26,1}} \cdot e^{-\frac{S_1}{10,9}} = 0,2455 \cdot 0,000649 = 0,0002;$$

$$I_{2,sp} = \frac{I_1 + I_2}{2} = 36,425; \quad p_2 = P(I \geq I_{2,sp}) \cdot P(S_2 \leq S \leq S_1) = e^{-\frac{I_{2,sp}}{26,1}} \cdot \left( e^{-\frac{S_2}{10,9}} - e^{-\frac{S_1}{10,9}} \right) = 0,2477 \cdot 0,001 = 0,00025;$$

$$I_{3,sp} = \frac{I_2 + I_3}{2} = 36,017; \quad p_3 = P(I \geq I_{3,sp}) \cdot P(S_3 \leq S \leq S_2) = e^{-\frac{I_{3,sp}}{26,1}} \cdot \left( e^{-\frac{S_3}{10,9}} - e^{-\frac{S_2}{10,9}} \right) = 0,2516 \cdot 0,00244 = 0,0006;$$

итн. За останатите веројатности на идентичен начин се добива:

$$p_4 = 0,25414 \cdot 0,006144 = 0,0016;$$

$$p_5 = 0,0,25527 \cdot 0,0153 = 0,0039;$$

$$p_6 = 0,25411 \cdot 0,038298 = 0,0097;$$

$$p_7 = 0,24651 \cdot 0,095854 = 0,0236;$$

$$p_8 = 0,2176 \cdot 2399 = 0,0522;$$

$$p_9 = 0,15652 \cdot 0,23255 = 0,0364.$$

Со сумирање на сите парцијални веројатности се добива:

$$P_0 = p_1 + p_2 + p_3 + \dots + p_8 + p_9 = 0,1284.$$

Тоа значи дека веројатноста да дојде до повратен прескок кога ќе удри гром во посматраниот столб изнесува 12,84%, или, приближно, секој 8-ми удар на громот во овој столб ќе предизвика повратен прескок.

Доколку кривата на опасни параметри ја претставевме со поголем број точки а „интегрирањето“ го вршевме со повеќе интервали, ќе добиевме поточен резултат. Така, на пример, ако облста на опасните параметри наместо на 9, ја поделиме на 75 подобласти, ќе добиеме вредност  $P_0 = 0,137$ . Ако оваа вредност ја програсиме за „точна“, тогаш грешката на претходно добиениот резултат со 9 подобласти за интеграција, ќе изнесува:

$$Gr\% = \frac{0,1284 - 0,137}{0,137} \cdot 100 = -6,25\%.$$

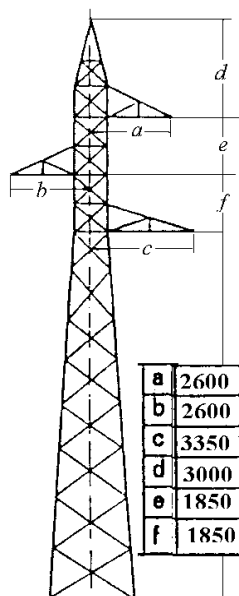
### 9.5.4. Пресметување на кривата на опасни параметри и веројатноста $P_0$ во конкретен случај

Како илустрација на обработуваната методологија ќе бидат прикажани резултатите од пресметаните веројатности за повратен прескок  $P_0$  за 110 kV столбови од типот S (ЕМО-Охрид) (слика 9.18), за разни услови. Пресметките се вршени под претпоставката дека параметрите на струјата на громот  $P(I)$  и  $P(S)$  се независни случајни величини кои подлежат на експоненцијалниот закон на распределба, според изложеното во главата 3. Притоа, за да се утврди влијанието на одделните фактори врз ризикот за повратен прескок, пресметките се вршени:

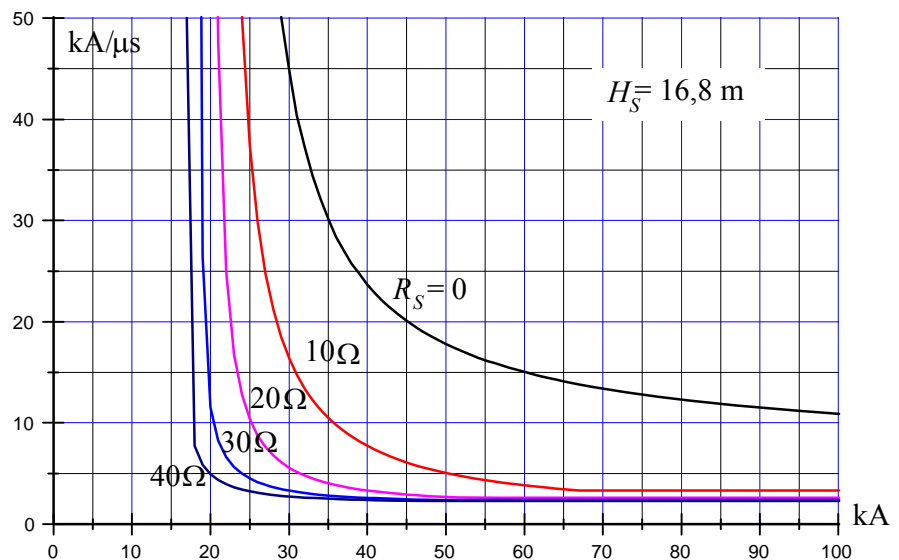
- за разни основни височини на столбовите: 12,9 m; 16,8 m; 20,8 m; 24,8 m и 28,8 m,
- за разни вредности на отпорноста на распростирање на заземјувачите на столбовите, во интервалот од 0 до 50  $\Omega$ .
- за изолаторски вериги со 6 и со 7 капести изолатори од типот K170/80;

Останатите податоци и претпоставки за кои се вршени пресметките се следните:

- 1) распоните на посматраниот надземен вод се еднакви и изнесуваат  $l = 300$  m;
- 2) сите столбови имаат иста отпорност на распростирање;
- 3) максималното работно напрегање на спроводниците изнесува  $\sigma_M = 9$  daN/mm<sup>2</sup>;
- 4) максималното работно напрегање на заштитното јаже изнесува  $\sigma_{Mz} = 26$  daN/mm<sup>2</sup>;
- 5) провесите на спроводниците и на заштиното јаже се еднакви и во средината од распонот изнесуваат  $f_{pr} = f_{zj} = 8,5$  m;
- 6) заштитното јаже е од типот Fe III 50 mm<sup>2</sup>;
- 7) пресметката на преодниот процес во импулсниот период и временскиот тек на напонот на изолацијата  $U_{iz}(t)$  е вршена според приближната методологија, изложена во оваа глава;
- 8) волтсекундната карактеристика на изолацијата е добиена според моделот од (9.48).



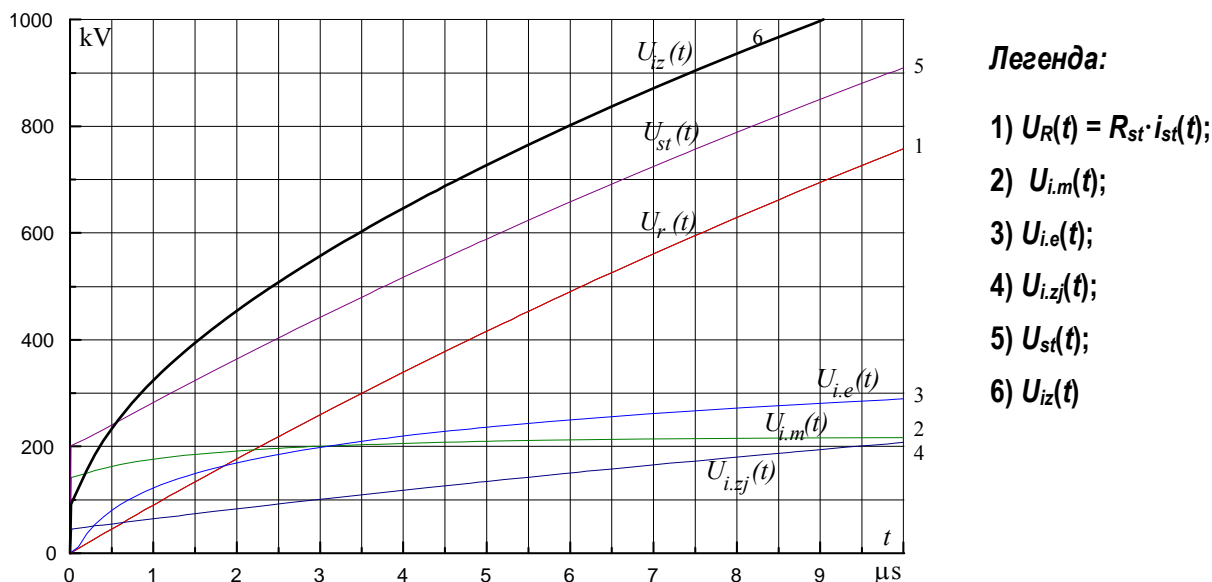
Слика 9.18. Изглед на столбот тип S (ЕМО-Охрид)



Слика 9.19. Криви на опасни параметри за столбот тип S (ЕМО-Охрид) со висина  $H_{st}=16,8$  m

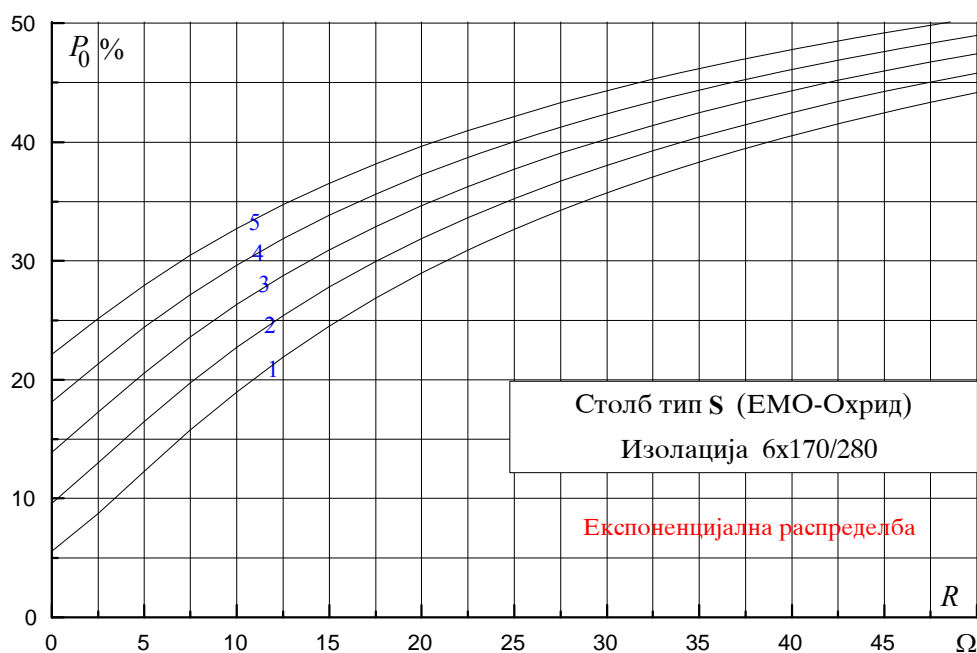
На сликата 9.19 се прикажани кривите на опасни параметри за столбот S (ЕМО-Охрид) со висина  $H_{st} = 16,8$  m. за разни вредности на отпорноста на распростирање на столбовите  $R_S$ . Притоа се работело со изолаторски вериги од типот 6xK170/280.

На сликата 9.20 се прикажани пресметаните временски текови на напоните и струите при удар на гром со линеарно растечко чело и со константна стрмнина  $S = 10$  kA/ $\mu$ s во разгледуваниот 110 kV столб тип S со висина  $H=16,8$  m и со отпорност на распростирање на заземјувачот  $R_{st} = 10$   $\Omega$ .



**Слика 9.20. Временски тек на напоните и струјата во столбот, при удар на гром со константна стрмнина  $S = 10$  kA/ $\mu$ s во 110 kV столб тип S (ЕМО-Охрид) со висина  $H_{st} = 16,8$  m и  $R_{st} = 10$   $\Omega$ .**

На сликата 9.21 и во табелата 9.2 се прикажани резултатите од пресметките за веројатноста на повратен прескок  $P_0$  за случајот кога изолаторските вериги се од типот 6xK170/280. Табелата 9.3, пак, се однесува на случајот кога изолаторските вериги се од типот 7xK170/280.





Слика 9.21. Зависност на веројатноста  $P_0$  од отпорноста  $R_{st}$  на заземјувачот на столбот, за разни висини  $H_{st}$ : 12,9 m; 16,8 m; 20,8 m; 24,8 m; 28,8 m

Табела 9.2. Табеларен приказ на зависноста  $P_0\% = f(R_{st})$ , од сликата 9.21 (изолација 6×К3)

$R_{st}, \Omega$	$H_{st} = 12,9 \text{ m}$	$H_{st} = 16,8 \text{ m}$	$H_{st} = 20,8 \text{ m}$	$H_{st} = 24,8 \text{ m}$	$H_{st} = 28,8 \text{ m}$
0.0	5.57	9.59	13.90	18.13	22.13
2.5	8.76	13.00	17.29	21.37	25.16
5.0	12.30	16.48	20.58	24.42	27.96
7.5	15.77	19.75	23.61	27.18	30.48
10.0	18.98	22.73	26.33	29.66	32.73
12.5	21.89	25.40	28.76	31.87	34.74
15.0	24.51	27.80	30.94	33.85	36.54
17.5	26.87	29.95	32.89	35.63	38.16
20.0	28.99	31.89	34.66	37.24	39.63
22.5	30.91	33.64	36.26	38.70	40.96
25.0	32.66	35.24	37.72	40.03	42.18
27.5	34.25	36.70	39.05	41.25	43.30
30.0	35.72	38.04	40.28	42.37	44.34
32.5	37.06	39.28	41.41	43.41	45.29
35.0	38.31	40.42	42.46	44.38	46.18
37.5	39.46	41.48	43.44	45.28	47.01
40.0	40.53	42.47	44.35	46.11	47.78
45.0	41.53	43.39	45.20	46.90	48.51
45.0	42.47	44.26	45.99	47.64	49.19
47.5	43.35	45.07	46.75	48.33	49.84
50.0	44.17	45.83	47.45	48.99	50.45

Табела 9.3. Табеларен приказ на зависноста  $P_0(R_{st}), \%$ , за случајот со изолација 7×К3

$R_{st}, \Omega$	$H_{st} = 12,9 \text{ m}$	$H_{st} = 16,8 \text{ m}$	$H_{st} = 20,8 \text{ m}$	$H_{st} = 24,8 \text{ m}$	$H_{st} = 28,8 \text{ m}$
0.0	3.05	5.85	9.14	12.58	16.00
2.5	5.20	8.39	11.84	15.29	18.63
5.0	7.85	11.18	14.62	17.96	21.16
7.5	10.65	13.96	17.29	20.49	23.52
10.0	13.39	16.60	19.78	22.82	25.69
12.5	15.97	19.05	22.08	24.95	27.66
15.0	18.37	21.30	24.17	26.89	29.46
17.5	20.57	23.36	26.09	28.67	31.10
20.0	22.60	25.25	27.84	30.29	32.60
22.5	24.46	26.98	29.45	31.77	33.97
25.0	26.17	28.58	30.92	33.14	35.24
27.5	27.75	30.04	32.28	34.40	36.41
30.0	29.21	31.40	33.54	35.57	37.50
32.5	30.56	32.66	34.72	36.66	38.51
35.0	31.82	33.84	35.81	37.68	39.45
37.5	32.99	34.93	36.82	38.62	40.33
40.0	34.09	35.95	37.78	39.51	41.16
45.0	35.12	36.92	38.67	40.35	41.94
45.0	36.09	37.82	39.51	41.13	42.67
47.5	37.00	38.67	40.31	41.87	43.37

50.0	37.86	39.47	41.06	42.58	44.02
------	-------	-------	-------	-------	-------

## 10. ЗАШТИТА НА РАЗВОДНИТЕ ПОСТРОЈКИ И ТРАНСФОРМАТОРСКИ СТАНИЦИ ОД АТМОСФЕРСКИ ПРЕНАПОНИ

Причини за појава на опасни пренапони од атмосферско потекло во една разводна постројка се:

- 1) директните празнења во самата постројка и
- 2) упадните бранови коишто наидуваат по приклучните водови.

Разводните постројки во споредба со водовите заземаат мал простор поради што бројот на директни празнења на громот во постројката во текот на годината е значително помал од бројот на упадните бранови. Но пренапоните што ги предизвикуваат директните празнења се сепак значително поопасни за самата постројка поради што тие треба да бидат сведени на минимум. Затоа заштитата на постројките од директни празнења мора да пружа висок степен на доверливост.

Разводните постројки се штитат од директни удари на гром обично со помош на громобрани, но понекогаш, иако поретко, се штитат и со помош на заштитни јажиња. Бројот на громобраните, нивната височина како и местото на нивното поставување во разводната постројка се избираат така што секој елемент од постројката да се наоѓа во нивната штитена зона, а веројатноста за продор на громот низ заштитата и директен удар во елементите од постројката да е занемарливо мала, под 0,1%. Затоа може да се смета дека приклучните водови и пренапонските бранови коишто наидуваат по нив се единствениот извор на опасни пренапони.

Кога ќе дојде до празнење на надземниот вод, пропратено со повратен прескок, на местото на ударот се формираат бранови коишто се простираат влево и вдесно. Тие бранови се движат по фазните спроводници и упаѓаат во разводните постројки. Бранот на местото на ударот има бесконечно стрмно чело и амплитуда која што е приближно еднаква на производот од импулсната отпорност на распространување на заземјувачот на столбот  $R_s$  и амплитудата на струјата на громот  $I_m$ , т.е.  $U_m \approx R_s \cdot I_m$ . При патувањето на бранот од местото на ударот до разводната постројка, под дејство на импулсната корона што настанува на спроводникот, доаѓа до негово изобличување. Неговото рамно чело се искосува а неговата амплитуда незначително се намалува. Ориентационо може да се смета дека на секој изминат километар челото на патувачкиот бран се зголемува за  $1 \mu s$ , така што обликот на бранот пред да упадне во постројката ќе биде поинаков од оној што тој го имал на местото на своето формирање.

Бидејќи импулсната цврстина на изолацијата на водот (т.н. "линиска изолација") може значително да ја надмине изолационата цврстина на одделните апарати во постројката, бранот кој притоа се формира на местото на ударот може да биде опасен за некои од апаратите во постројката. Најголемата опасност, притоа, се јавува кај енергетските трансформатори бидејќи тие се приклучени на краевите од надземните водови и како такви претставуваат точки на дисконтинуитет во кои доаѓа практично до тотална рефлексивност на упадните бранови. Енергетските трансформатори се во исто време најскапите и најважните елементи во постројката бидејќи пробивот на нивната главна изолација (т.е. изолацијата на намотките према заземјените делови од трансформаторот) ќе значи и делумен или целосен испад на самата постројка, а тоа е сврзано со големи штети не само заради потребната поправка на пробиеениот трансформатор туку и заради прекинот во испораката на електрична енергија. Честопати при упад на бранови со стрмно чело во постројката страда и подолжната изолација кај енергетските трансформатори, т.е. изолацијата помеѓу самите навивки од намотките на трансформаторот, а тоа повторно доведува до истите последици како и во случајот на пробив на главната изолација.

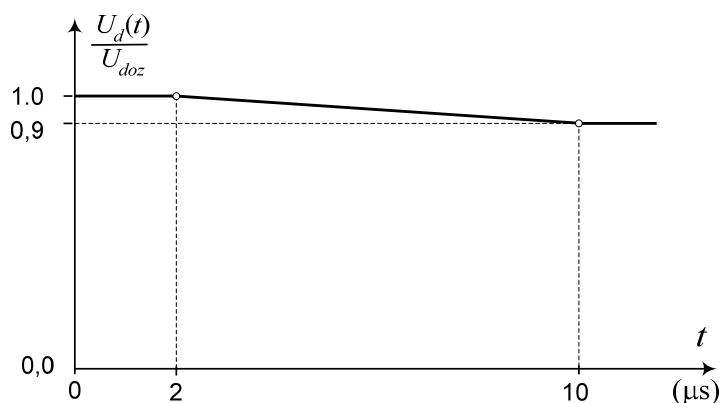
За да можеме пренапоните што се јавуваат во постројката да ги поделиме на опасни и безопасни потребно е уште да се знае допуштеното импулсно ниво на изолацијата на самата опрема  $U_d(t)$ . Под *допуштено импулсно ниво* на изолацијата ќе ја подразбираме горната граница на импулсните пренапони од атмосферско потекло чија појава може да се дозволи при нормалното работење на уредот (опремата) а притоа таквиот пренапон да не биде опасен за самиот уред.

Практиката покажала дека, во таа смисла, енергетскиот трансформатор е не само најскапиот и најважниот туку и најосетливиот елемент на постројката. Освен тоа од економски причини тој има релативно пониско изолационо ниво во однос на останатите елементи на постројката и во исто време кај него се јавуваат и најголемите пренапони. Статистиката говори дека во најголемиот број случаи (53% кај постројките со напон 35 kV и практично 100% кај постројките со номинален напон 110 kV и повисок) повредите на елементите во постројките со нормална заштитна шема настануваат токму на енергетските трансформатори.

### 10.1. ОБЛИК НА ДОПУШТЕНИТЕ НАПОНИ НА ИЗОЛАЦИЈАТА НА ТРАНСФОРМАТОРОТ

Од тука погоре изложеното произлегува заклучокот дека кај најголемиот број постројки е доволно да се знае допуштеното импулсно ниво на изолацијата на енергетскиот трансформатор бидејќи преку споредба на обликот на пренапонот кај трансформаторот со кривата  $U_d(t)$  на неговата изолација се проценува дали еден упаден бран кој ги предизвикал тие пренапони ќе биде опасен за постројката или не. Од тие причини на прашањето за обликот на допуштениот импулсен напон на енергетските трансформатори  $U_d(t)$  му било во минатото посветено доста внимание така што денес може да се смета дека овој проблем е веќе апсолвиран.

Импулсната цврстина на изолацијата на одделните високонапонски апарати, меѓу кои и цврстината на изолацијата кај енергетските трансформатори, се оценува врз основа на испитувањата со полн и со пресечен бран со стандарден облик. Бидејќи формата на атмосферските пренапони коишто се јавуваат во текот на експлоатацијата значително се разликува од формата на испитните бранови, се јавила потреба за утврдување на еден критериум врз основа на кој секој напонски импулс којшто ја напрега изолацијата на трансформаторот ќе може да се квалификува како допуштен (опасен) или опасен.



Слика 10.1. Критериум за допуштен напон за главната изолација на енергетските трансформатори  $U_d(t)$

Кај нас во изминатиот период се користел критериумот што бил долги години воспоставен во советската пракса, дефиниран преку т.н. "Технички правила" ("Руководящие

указания"). Според нив обликот на кривата  $U_d(t)$  е прикажан на сликата 10.1. Притоа максималната вредност  $U_{doz}$  на допуштениот напон е за 2 – 3% пониска од испитниот напон  $U_{isp}$  на трансформаторот со полн бран, т.е.  $U_{doz} = (0,97 - 0,98) \cdot U_{isp}$ .

Сличен е пристапот и во САД но и во земјите од Европската унија. Кај првите (САД), критериумот е уште поупростен и се сведува на релацијата:

$$U_d(t) = 1,15 \cdot \text{BIL}; \quad (\text{BIL} = \text{Basic Insulation Level}).$$

Во европските земји се применува критериум сличен на оној од сликата 10.1 и тој е регулиран со препораките IEC 71-1 и IEC 71-2.

Значи доколку во ниту еден момент за време на преодниот процес кривата на пренапонот на трансформаторот  $U_{TR}(t)$  не ја надминува кривата на допуштениот напон  $U_d(t)$  ќе сметаме дека изолацијата од трансформаторот ќе го издржи импулсниот пренапон предивикан од упадниот бран, т.е.:

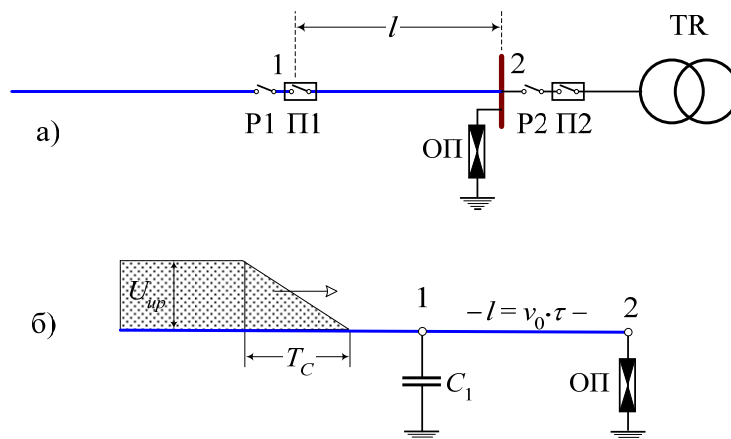
$$U_{TR}(t) < U_d(t); \quad \forall t > 0.$$

Притоа со  $t = 0$  е означен моментот кога упадниот бран стигнал до местото каде што се наоѓа енергетскиот трансформатор.

## 10.2. МЕСТО НА ПОСТАВУВАЊЕ НА ОДВОДНИЦИТЕ НА ПРЕНАПОНИ ВО ПОСТРОЈКИТЕ

Одводникот на пренапони (ОП) е основно средство за заштита на апаратите во разводната постројка од атмосферски пренапони. Тие ги штитат не само апаратите коишто се наоѓаат како пред нив (како на пример прекинувачот П1 и разделувачот Р1 од сликата 10.2а) така и уредите зад себе (нпр. разделувачот Р2, прекинувачот П2 и енергетскиот трансформатор TR).

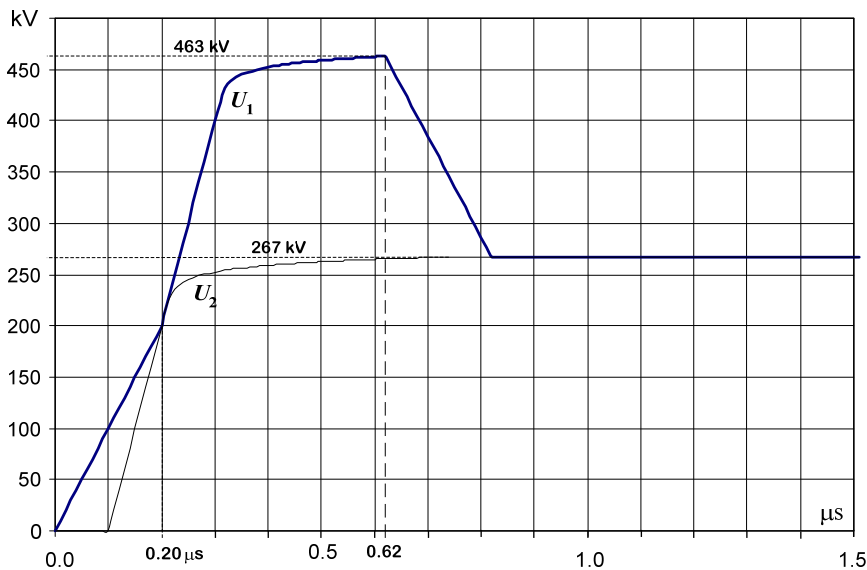
Нека ја посматраме постројката прикажана на сликата 10.2а во која одводникот ОП треба да ги штити сите елементи од постројката. Обично апаратите пред и зад одводникот (Р1, П1, Р2 и П2) не бараат толку строга заштита како што тоа го бара енергетскиот трансформатор TR од веќе изложените причини. Доколку сакаме само со еден одводник на пренапони да ги штитиме подеднакво успешно уредите пред ОП како и оние зад него, ќе треба местото на приклучување на одводникот да се избере внимателно. Понекогаш, кога постројката има големи димензии и растојанијата помеѓу уредите и апаратите во неа се исто така големи, заштитата не ќе може успешно да се изврши само со еден, туку за таа цел ќе биде потребен поголем број одводници на пренапони.



Слика 10.2. Случај кога одводникот на пренапони штити опрема пред себе

Легенда:  $Z_C = 400 \Omega$ ;  $U_{up} = 620 \text{ kV}$ ;  $T_C = 0,62 \mu\text{s}$ ;  $U_{pr} = 267 \text{ kV}$ ;  $l = 30 \text{ m}$ ;  $t_1 = l/v_0 = 0,1 \mu\text{s}$ ;

Да го посматраме најнапред случајот кога се исклучени разделувачот P2 и прекинувачот П2. Тогаш одводникот ќе има задача да ги штити само уредите P1 и П1 пред него од опасни пренапони предизвикани од упадните бранови. Нека растојанието помеѓу одводникот на пренапони и штитените уреди е  $l = 30$  m и нека во постројката упаѓа бран со косо чело и рамен грб, со амплитуда  $U_{up} = 620$  kV и време на чело  $T_C = 0,62$   $\mu$ s. Во тој случај стрмнината на упадниот бран ќе биде  $S = 1000$  kV/ $\mu$ s. Ако за поедноставна анализа го занемариме присуството на еквивалентниот капацитет  $C_1$  на овие два уреда, тогаш обликот на напонот  $U_1$  во точката каде што се приклучени овие два уреда како и обликот на напонот на одводникот  $U_2$ , ќе бидат прикажани на сликата 10.3.



Слика 10.3. Облик на напонот на опремата ( $U_1$ ) и на одводникот на пренапони ( $U_2$ )

Лесно може да се покаже, што впрочем се гледа и од самата слика 10.4, дека максималната вредност на напонот  $U_{1,max}$  што ќе се постигне на опремата во посматраниот случај ќе биде:

$$U_{1,max} = U_{pr} + 2S \cdot \frac{l}{v_0} = U_{pr} + 2S \cdot \tau \quad (10.1)$$

Значи темената вредност на пренапонот зависи, во основа, од карактеристиките на одводникот, т.е. од неговиот преостанат напон  $U_{pr}$ , од стрмнината на упадниот бран  $S$  и од времето на простирање  $\tau = l/v_0$  на брановите од штитените уреди (точка 1) до самиот одводник. Бидејќи времето на простирање зависи линеарно од растојанието  $l$  помеѓу штитените уреди и одводникот, произлегува дека темената вредност на пренапонот  $U_{1,max}$  зависи од растојанието  $l$  на кое се наоѓа штитената опрема во однос на одводникот.

Наполно истиот заклучок и истата формула ќе важи и во случајот кога елементите П2 и P2 се вклучени а одводникот треба да ги штити и сите уреди зад него, па и енергетскиот трансформатор TR.

Од оваа релација може да се определи вредноста на максималното растојание  $l_{max}$  помеѓу одводникот и штитениот уред за којшто е познат допуштениот (подносливиот) импулсен напон  $U_{doz}$ :

$$l_{max} = v_0 \cdot \frac{U_{doz} - U_{pr}}{2S}; \quad v_0 = 300 \frac{m}{\mu s} \quad (10.2)$$

Се разбира дека оваа релација дава ориентациони резултати бидејќи таа е базирана на идеализиран модел и со нејзе не се опфатени капацитетите на уредите во постојката а одводникот е третиран идеализирано како идеален напонски генератор со внатрешна емс  $E_{od} = U_{pr}$  со бесконечна мала внатрешна отпорност  $R_{od} = 0$ . Но практиката покажува дека таа сепак дава добри проценки за вредноста на максималното дозволено растојание  $l_{max}$ .

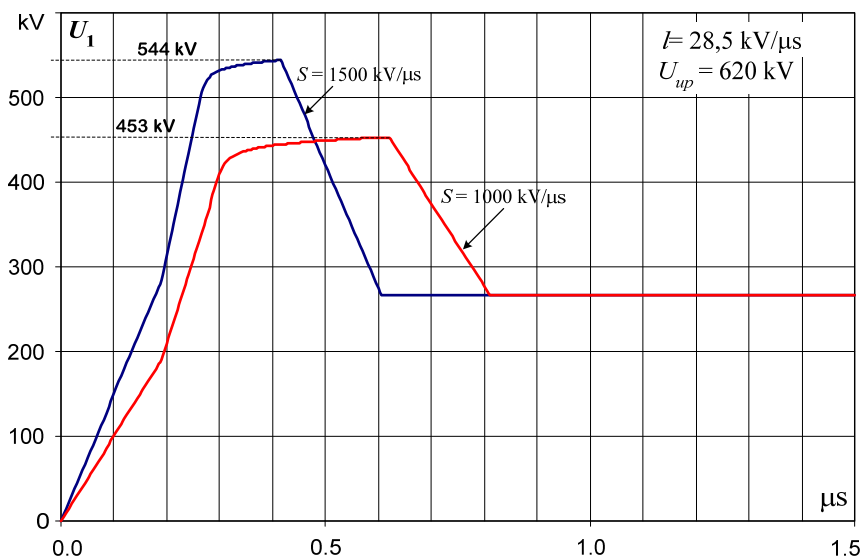
**Пример 10.1.** Колкаво е максималното дозволено растојание  $l_{max}$  помеѓу одводникот ОП, чијшто преостанат напон изнесува  $U_{pr} = 267$  kV и прекинувачот П1 во постројката од сликата 10.1а ако неговиот поднослив импулсен напон изнесува  $U_{dop} = 550$  kV. Пресметките да се направат за случај кога упадниот бран има стрмина: а)  $S = 1000$  kV/ $\mu$ s и б)  $S = 1500$  kV/ $\mu$ s.

**Решение:**

$$\text{а) } S = 1000 \text{ kV/ms; } l_{max} = v_0 \cdot \frac{U_{doz} - U_{pr}}{2S} = 300 \cdot \frac{550 - 267}{2 \cdot 1000} = 42,5 \text{ m}.$$

$$\text{б) } S = 1500 \text{ kV/ms; } l_{max} = v_0 \cdot \frac{U_{doz} - U_{pr}}{2S} = 300 \cdot \frac{550 - 267}{2 \cdot 1500} = 28,3 \text{ m}.$$

На следната слика (сл. П.10.1) е прикажан обликот на напонот на прекинувачот  $U_1(t)$  кога упадниот бран има амплитуда  $U_{up} = 620$  kV и кога растојанието помеѓу штитената опрема и одводникот на пренапони ( $U_{pr} = 267$  kV) изнесува  $l = 28,3$  m, за обата случаја а) и б). Очигледно е дека формулата (10.1) дава добри проценки за потребното растојание  $l_{max}$ .



**Слика П.10.1. Облик на напонот на опремата  $U_1(t)$  за разни стрмнини  $S$  на упадниот бран**

**Пример 10.2.** Колкаво е максималното дозволено растојание  $l_{max}$  помеѓу одводниот ОП, чијшто преостанат напон изнесува  $U_{pr} = 267$  kV и прекинувачот трансформаторот TR во постројката од сликата 10.1 ако неговиот поднослив импулсен напон изнесува  $U_{dop,TR} = 450$  kV. Пресметките да се направат за случај кога упадниот бран има стрмина  $S = 1000$  kV/ $\mu$ s.

**Решение:**

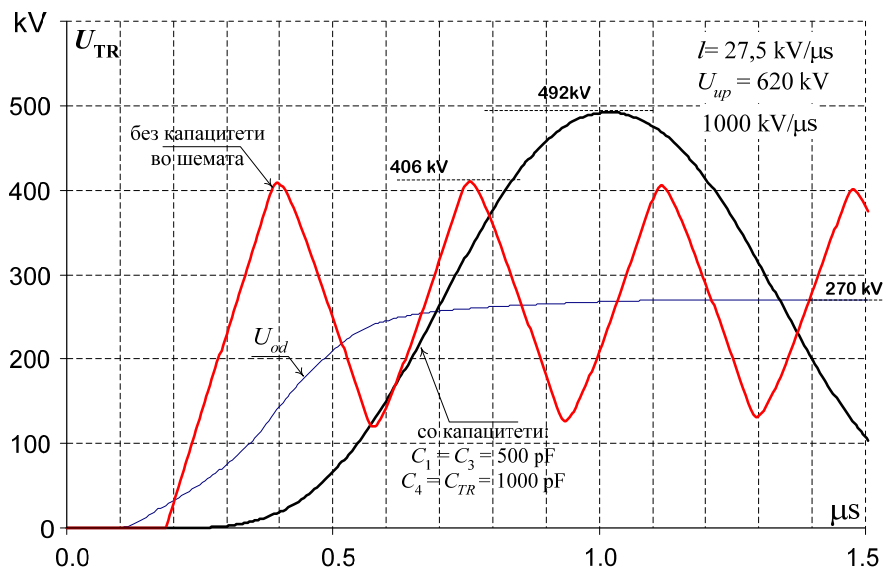
Во овој случај ќе имаме:

$$S = 1000 \text{ kV/ms}; \quad l_{\max} = v_0 \cdot \frac{U_{\text{doz.TR}} - U_{pr}}{2S} = 300 \cdot \frac{450 - 267}{2 \cdot 1000} = 27,5 \text{ m}.$$

За вака пресметаното растојание  $l$  помеѓу одводникот на пренапони и трансформаторот TR се направени компјутерски симулации за следните два случаја:

- не е земено предвид присуството на капацитетите на опремата и трансформаторот TR. Во тој случај за амплитудата на пренапонот на трансформаторот е добиена вредноста  $U_{TR,\max} = 406 \text{ kV}$ ;
- земена е предвид капацитивноста на: елементите P1 и П1:  $C_1 = C_{P1} + C_{П1} = 500 \text{ pF}$ ; елементите P2 и П2:  $C_2 = C_{P2} + C_{П2} = 500 \text{ pF}$ ; капацитивноста на енергетскиот трансформатор:  $C_4 = C_{TR} = 1000 \text{ pF}$ .

Резултатите од пресметките на преодниот процес во првата  $1,5 \mu\text{s}$ , за овие два случаја се прикажани на сликата П. 10.5.



Слика П.10.5. Временски тек на напонот на тр-рот  $U_{TR}(t)$

### 10.3. КРИВА НА ОПАСНИ БРАНОВИ НА ПОСТРОЈКАТА

Амплитудата на пренапоните коишто се создаваат во постројката при упад на пренапонски бран од атмосферско потекло, како што е познато, зависи од повеќе фактори меѓу кои доминантни се преостанатиот напон на одводникот  $U_{pr}$ , амплитудата на упадниот бран  $U_m$  и неговата стрмнина  $S$ .

Упадниот бран  $U_{up}(t)$  во разни точки од постројката предизвикува различни пренапони и тие се разликуваат како по својата форма, така и по својата амплитуда. Бидејќи секој апарат во постројката може да има различно допуштено импулсно напонско ниво  $U_d(t)$ , при анализата дали еден упаден бран ќе предизвика опасни пренапони во постројката, ќе биде потребно за секој апарат да се врши споредба на напонот  $U(t)$  што кај него го предизвикува упадниот бран со неговото допуштено импулсно ниво  $U_d(t)$ .

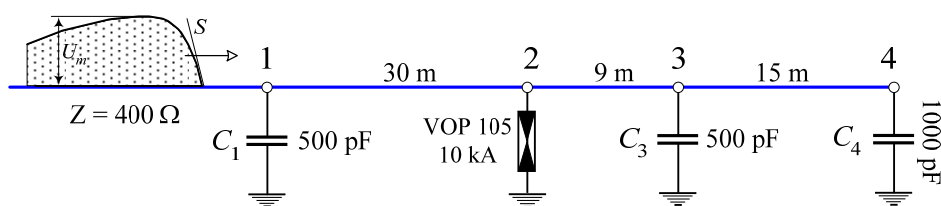
Ако извршиме серија вакви испитувања, за поголем број упадни бранови со разни вредности на амплитудата и стрмнината можеме да добиеме множество од парови  $(U_m, S)$  кое во рамнината  $U_m-O-S$  упадните бранови ги дели на опасни и безопасни. Тоа множество точки



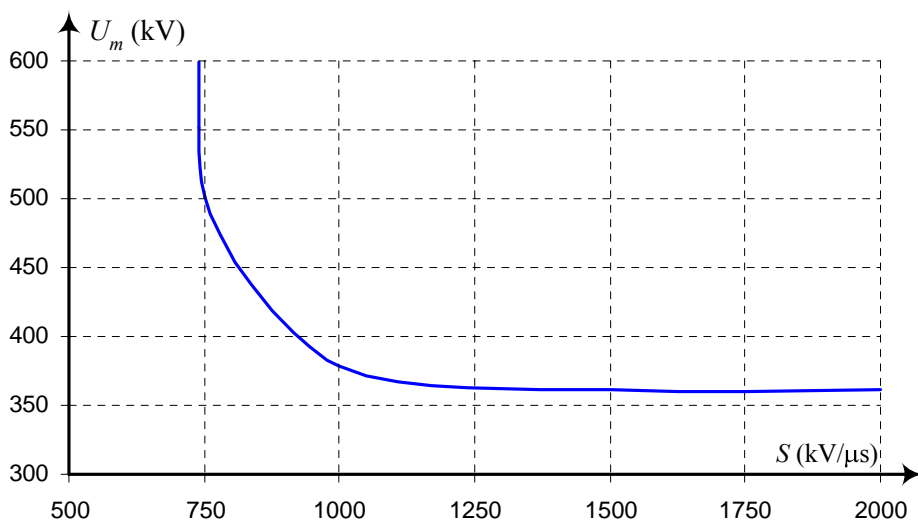
се нарекува "крива на опасни бранови" и претставува важна карактеристика која доста зборува за степенот на заштитата на една разводна постројка од упадните бранови со атмосферско потекло. Секој упаден бран којшто има параметри  $U_m$  и  $S$  што лежат над оваа крива ќе биде опасен за посматраната постројка.

Како што веќе беше напоменато, најголемите пренапони во постројката обично настануваат кај енергетските трансформатори. Бидејќи во исто време допуштеното импулсно ниво на еден енергетски трансформатор од економски причини е обично помало од допуштеното импулсно ниво на останатата опрема во постројката, може да се каже дека, во принцип, секој упаден бран којшто не е за опасен изолацијата на трансформаторот нема да биде опасен ниту за изолацијата на останатите апарати и уреди во постројката.

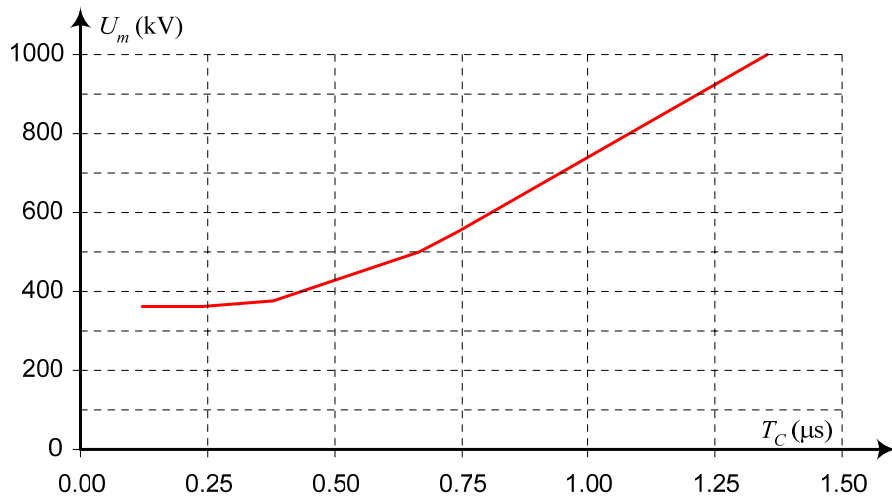
На сликата 10.6 е прикажана заменската шема од претходно разгледуваната трансформаторската станица од сликата 10.2а. На следната слика 10.7 е прикажана кривата на опасни бранови за таа постројка  $U_m = f(S)$  а на сликата 10.8 е прикажана кривата на опасни бранови  $U_m = f(T_c)$ . Обликот на овие криви е типичен за мнозинството постројки. Секој бран чишто параметри  $(S, U_m)$  припаѓаат на областа десно од кривата на опасни параметри  $U_m(S)$  ќе бидат опасни за оваа постројка. Притоа како критериум за допушети импулсни напони на енергетските трансформатори во таа постројка е усвоена кривата од сл. 10.1 со дозволен импулсен напон  $U_{doz} = 450 \text{ kV}$ .



Слика 10.6. Заменска шема на постројката од сликата 10.2



Слика 10.7. Крива на опасни бранови  $U_m = f(S)$  на постројката од сл. 10.6



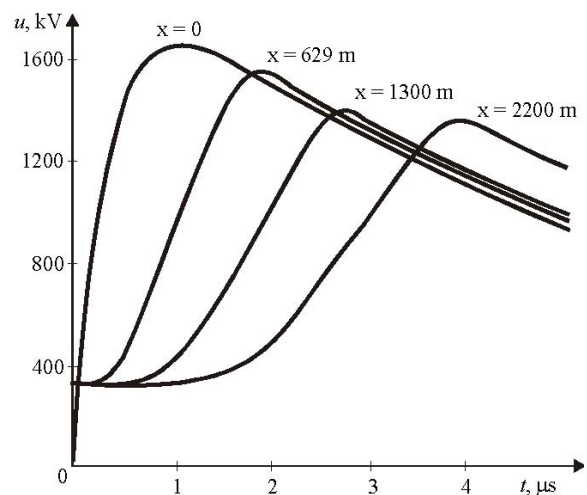
Слика 10.8. Крива на опасни бранови  $U_m = f(T_C)$  на постројката од сл. 10.6

Кривата на опасни бранови на една постројка можеме да ја прикажеме и во координатниот систем  $T_C - O - U_m$ , во форма на зависноста  $U_m = f(T_C)$ , каде што  $T_C$  е времето на челото на ударниот бран (слика 10.8). Ваквиот начин на претставување на кривата на опасните бранови е за практичните пресметки многу попогоден. Во тој случај областа на опасните параметри се наоѓа над оваа крива.

#### 10.4. ДЕФОРМАЦИЈА НА ПАТУВАЧКИОТ БРАН

Како што е веќе познато амплитудата на пренапоните што се јавуваат при удар на патувачките бранови во разводните постројки зависи во најголема мера од стрмнината  $S$  на ударниот бран. Затоа е многу битна правилната проценка на деформациите на патувачките бранови до кои доаѓа при нивното патување кон постројката за успешното формирање на заштитата на разводните постројки од овие пренапони.

Најголем удел во деформацијата на патувачкиот бран има појавата на импулсна корона. Познато е дека при простирањето на брановите со големи амплитуди на спроводниците/јажињата доаѓа до појава на коронско празнење. Тоа празнење е сврзано со појава на извесни загуби на енергијата на бранот а тие енергетски загуби се значително поголеми од цуловите загуби и загубите во земјата што се остваруваат при простирањето на ударниот бран. Покрај тоа импулсната корона предизвикува вештачко зголемување на капацитивноста на водот што доведува до промена (намалување) на брзината на простирање на патувачкиот бран. Сега разни делови од патувачкиот бран ќе се движат со различна брзина – погорните слоеви од бранот со помала брзина и обратно. Тоа ќе доведе до негова деформација која што, надворешно гледано, се манифестира со издолжување на неговото чело (сл. 4.5).



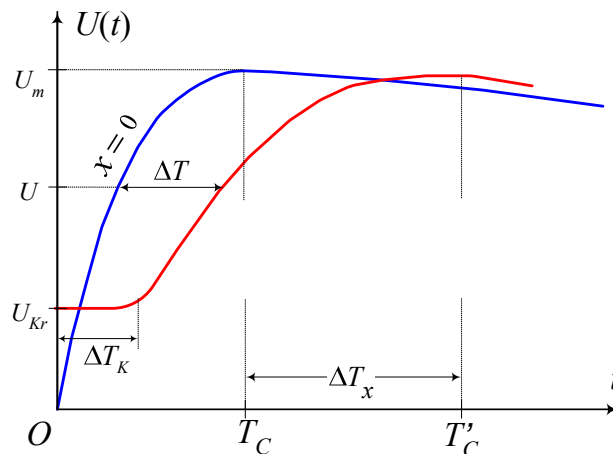
Слика 4.5. Облик на патувачкиот бран по изминат пат од 629, 1300 и 2200 m – респективно

Бидејќи промената на капацитивноста на водот под дејство на импулсната корона е сложен и нелинеарен процес, неговото аналитичко претставување и решавање е премногу комплицирано и како такво тоа е сосема непрактично. Затоа од поголемо практично значење за решавањето на овој проблем се експерименталните резултати коишто се однесуваат на придушувањето и деформацијата на патувачките бранови под дејство на импулсната корона а коишто се добиени со мерења на реалните надземни водови. Истражувањата во овој домен се вршени уште од 30-тите години на минатиот век така што денес веќе располагаме со доволно експериментално верифицирани резултати коишто ќе можат да се користат во нашите анализи.

Експериментите на реалните водови укажуваат на следните појави. Деформациите на брановите под дејство на короната се најизразени на челото на бранот. Притоа почетниот дел од бранот, чијшто напон е помал од критичниот напон на појава на короната  $U_{Kr}$ , сосема малку се деформира (поради загубите) и таквите деформации може слободно да се занемарат, особено кога станува збор за простирање на бранот по мали растојанија од неколку km. Кога напонот на бранот ќе достигне вредност еднаква на критичниот  $U_{Kr}$ , доаѓа до силна деформација на овој дел од бранот поради образувањето на т.н. "праг на короната" (слика 10.9). Широчината на прагот за негативната корона изнесува приближно  $0,5 \mu s$  за секој изминат km, додека за позитивната, тој е скоро два пати поголем. Во обата случаја во самиот праг на короната напонот пораснува незначително, за  $20 \div 40 kV$ . Челниот дел на деформираниот бран којшто се наоѓа зад прагот има значително помала стрмнина и секогаш помала амплитуда од стрмнината и амплитудата на соодветниот дел од појдовниот бран. Грбот на бранот се деформира но сосем незначително и опаѓа поспоро во споредба со опаѓањето на грбот на појдовниот бран.

На тој начин, по деформацијата, челото на бранот ќе биде:

$$T'_C = T_C + \Delta T_x$$



Слика 10.9. Деформација на патувачките бранови

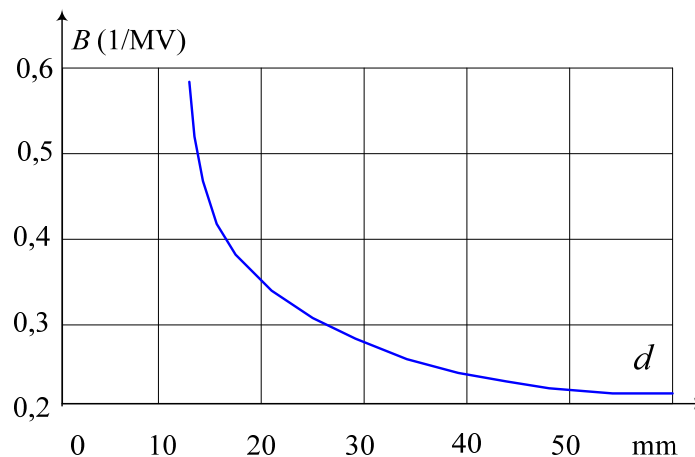
Кај простирањето на аperiodичните бранови, кои по својот облик се блиски на обликот од стандардниот полн испитен бран 1,2/50, до деформација доаѓа само на челото на бранот додека неговата амплитуда и обликот на грбот се менуваат сосема незначително. Затоа во практичните пресметки може да се смета дека грбот на овие бранови се простира без деформации и дека амплитудата на овие бранови останува непроменета. Но затоа притоа ќе мора да се земе предвид еквивалентното издолжување на челото на патувачкиот бран и на тој начин, со композиција на деформираното чело и недеформираниот грб, да се добие бараниот облик на бранот по неговата деформација, онаков каков што ќе пристигне пред разводната постројка.

Брановите коишто се отсечени на нивното чело како и кратковремените пикови што можат да се појават на патувачките бранови се интензивно подложни на влијанието на короната. Тие силно се деформираат и се придушваат веќе после изминат пат од еден километар.

Сите експерименти покажале дека еквивалентото издолжување на челото на бранот  $\Delta T_x$  под дејството на короната, т.е. поместувањето на максимумот на бранот  $U_m$ , е пропорционално на изминатиот пат на бранот  $x$ . Но во исто време тоа издолжување на челото зависи и од амплитудата  $U_m$  на патувачкиот бран. Во литературата се среќаваат голем број разновидни емпириски релации кои даваат меѓусебно слични резултати. Една од таквите релации е изразот (10.3).

$$\Delta T_x = \frac{x}{v_0} \cdot B \cdot U_m; \quad v_0 = 300 \text{ m}/\mu\text{s} \equiv 0,300 \text{ km}/\mu\text{s}. \quad (10.3)$$

Во него со  $x$  е означен изминатиот пат на бранот, изразен во (m), со  $U_m$  е означена амплитудата на патувачкиот бран, изразена во (MV), а издолжувањето на челото  $\Delta T_x$  се добива во  $\mu\text{s}$ . Константата  $B$  зависи од пречникот на спроводникот/јажето по кое што се простира набљудуваниот бран и нејзината вредност може да се отчита од дијаграмот прикажан на сликата 10.10.



Слика 10.10. Зависност на константата  $B$  од пречникот на јажето  $d$

Во советските "Препораки"<sup>1</sup> се препорачува слична емпиришка релација (10.4):

$$\Delta T_x = \left(0,5 + \frac{8U_m}{h_{pr.sr}}\right) \cdot x, \quad (10.4)$$

каде што изминатиот пат  $x$  се изразува во (km), амплитудата на бранот  $U_m$  во (MV) и средната (просечната) височина на спроводникот пој патува бранот,  $h_{pr.sr}$ , во (m). Во тој случај издолжувањето на челото,  $\Delta T_x$ , се добива во  $\mu\text{s}$ .

Релациите (10.3) и (10.4) се однесуваат на деформациите на челото за случајот со "негативна" корона, што е за нас од посебен практичен интерес бидејќи, како што е добро познато, околу 90% од празнањата се со негативен поларитет. Покрај тоа од сигурносен аспект е необјективно да се оперира со изразите за "позитивна" корона кај која деформациите се значително поголеми.

<sup>1</sup> (Рукводящие указания по защите от перенапряжений электротехнических установок переменного тока напряжением 3 – 220 kV, "Электрические станции", 1964-65 г.)

## 10.5. ДОЛЖИНА НА ОПАСНАТА ЗОНА НА ПОСТРОЈКАТА

Кривите на опасни бранови, прикажани на сликите 10.7 и 10.8, се однесуваат на брановите што упаѓаат во постројката. Овие бранови, пак, како што веќе видовме, имаат облик кој може значително да се разликува од обликот што тие го имале на местото на своето формирање на надземниот вод. На тој начин е можно еден бран кој без таквата деформација би бил опасен за постројката, по иминатиот пат  $x$  до постројката да стане сосема безопасен за неа. Тоа зависи од параметрите ( $U_m$ ,  $T_c$ ) на иницијалниот бран на местото на неговото настанување, но зависи и од изминатиот пат  $x$  на бранот од местото на настанување до самата постројка.

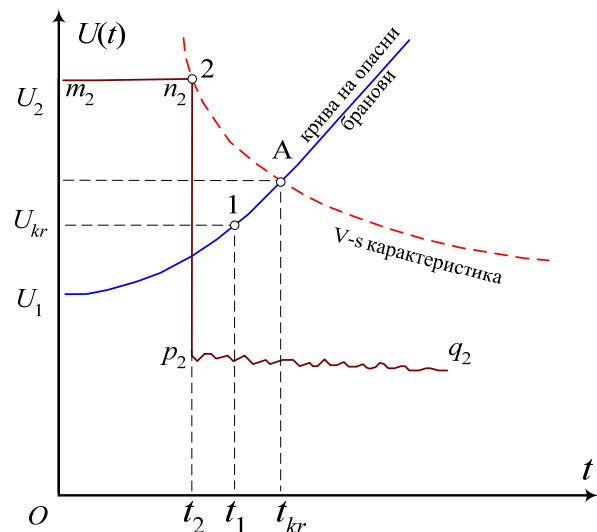
Постои една минимална должина  $L_0$ , со чие изминување, секој бран, независно од неговиот облик и амплитуда, ќе стане безопасен за постројката. Оваа должина се нарекува "должина на опасната зона" на постројката. Таа зависи од начинот, т.е. ефикасноста на заштитата на постројката од упадните бранови (број на одводници, нивни карактеристики и нивно разместување, импулсно изолационо ниво на опремата, растојание до најблискиот одводник и сл.) но зависи и од импулсната цврстина на линиската изолација на водот по кој се простира упадниот бран. Колку е ефикасноста на пренапонската заштита на постројката поголема а импулсната цврстина на линиската изолација помала, толку е должината  $L_0$  на опасната зона помала, а ризикот од повреда на нејзината опрема помал – и обратно.

Врз основа на познатата крива на опасни бранови на постројката и познатата волт-секундна карактеристика на линиската изолација на водот, можно е да се определи должината на опасната зона на една разводна постројка.

Од претходно изложеното произлегува заклучокот дека најопасни за постројката се брановите кои на местото на своето настанување имаат бесконечна стрмнина, а тоа се всушност брановите што се формираат при удар на гром во столбовите во самата опасна зона проследен со појава на повратен прескок. Во тој случај растојанието коешто овие бранови ќе треба да поминат за да станат безопасни е најголемо.

Да ја посматраме сега сликата 10.11 на која е прикажана кривата на опасни бранови на една постројка а во исто време е прикажана и волт-секундната карактеристика на линиската изолација на водот по кој што се простира упадниот бран во постројката.

За бранот со амплитуда  $U_1$  неопходното издолжување на челото што треба тој да го добие за да стане безопасен изнесува  $t_1$  (слика 10.11). Но бранот со амплитуда  $U_2$ , заради ограничената импулсна цврстина на линиската изолација, ќе биде отсечен во моментот  $t_2$ . Таквиот бран по неговото отсекување ќе се преобрази во бранот  $O-m_2-n_2-p_2-q_2$ , кој ќе продолжи да се простира кон разводната постројка. Неопходното издолжување на челото на овој бран за тој да стане безопасен, значи, изнесува  $t_2$ . Слично на тоа, секој бран чија што амплитуда има вредност поголема од "критичната" вредност  $U_{kr}$ , која што се добива во пресекот на споменатите две криви од сликата 10.11, ќе биде отсечен и ќе има време на чело кое нема да ја надмине вредноста  $t_{kr}$ , повторно добиена во пресекот на споменатите две криви (точка А).



Слика 10.11. Дефиниција на критично време и критичен напон на опасната зона

Најголемо издолжување на челото на бранот,  $t_{kr}$ , е потребно за оној бран чија што амплитуда на местото на настанувањето е еднаква на критичната -  $U_{kr}$  и наедно со тоа има бесконечна стрмина. Должината на изминатиот пат  $L_0$ , неопходна бранот да ја помине со цел да се постигне потребната деформација на неговото чело за тој да стане безопасен, во согласност со (10.4), изнесува:

$$L_0 = \frac{t_{kr}}{0,5 + (8 \cdot U_{kr} / h_{pr.sr})}. \quad (10.5)$$

Тоа е наедно и приближната должина на опасната зона на набљудуваната постројка. Во неа критичното време  $t_{kr}$  и критичниот напон  $U_{kr}$ , коишто се отчитуваат од дијаграмот на слика 10.11, се изразуваат во ( $\mu s$ ) и (MV) – респективно, додека просечната височина на спроводникот по кој што се простира бранот,  $h_{pr.sr}$ , се изразува во (m). Тогаш бараната должина на опасната зона  $L_0$  се добива во (km).

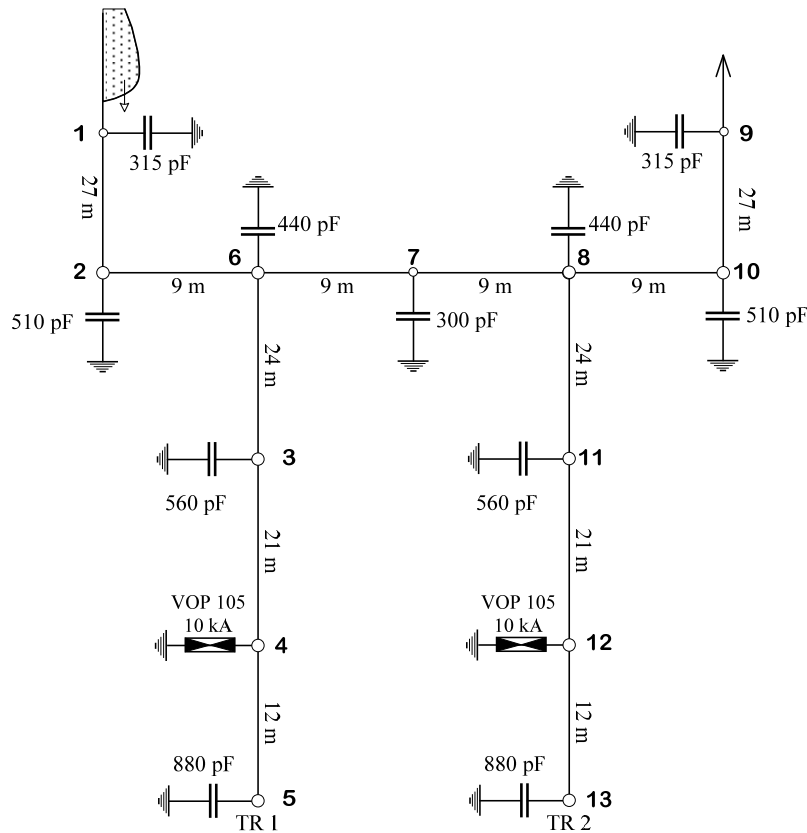
Секој удар на гром надвор од опасната зона не е опасен за разводната постројка, додека секој удар на гром во опасната зона може да биде опасен за неа. Од тие причини се стремиме, со зафати околу заштитата во постројката, должината  $L_0$  на опасната зона да ја намалиме до економски рационално ниво. Освен тоа на пристапниот дел од надземниот вод во должина  $L$  која треба да биде барем еднаква на должината на опасната зона ( $L \geq L_0$ ), ќе преземеме посебни мерки за заштита со цел да ја минимизираме можноста за формирање на бранови на тој дел кои би биле опасни за постројката. На тој начин го формираме т.н. "*заштитен приод*" на водот.

Во делот од водот што му припаѓа на заштитниот приод треба да ја смалиме можноста за пробив на заштитата од заштитното јаже и директен удар на гром во фазните спроводници. Со тоа го намалуваме бројот на директните удари во да го минимизираме поради што честопати на првите неколку километри од пристапните далекуводи се применуваат помали заштитни агли, чиишто вредности се движат помеѓу 15 и 20°. Исто така за да се смали ризикот од повратни прескоци во опасната зона, на сите столбови што му припаѓаат на заштитниот приод се врши "*појачување*" на заземјувањето, т.е. таквите столбови се заземјуваат со дополнителни заземјувачи кои имаат смалени импулсни отпорности на распростирање. Покрај тоа, заради намалувањето на веројатноста за повратен прескок, добро е столбовите во штитениот приод да имаат смалени висини.

Со воведувањето на штитениот приод на пристапните делници од сите надземни водови приклучени на една постројка покрај тоа што се минимизира бројот на директните удари на гром во опасната зона на водот, се елиминира и можноста за појава на големи струи низ одводниците на пренапони во постројката, а со тоа се штитат и самите одводници од оштетување или уништување. Исто така, со појачаното заземјување, можноста за појава на повратен прескок на столбовите во заштитниот приод се намалува и со тоа се намалува и можноста за формирање на упадни бранови со високи стрмини кои би биле опасни за изолацијата на апаратите во штитената постројка.

Доволно е должината на заштитениот приод  $L$  да биде еднаква на должината  $L_0$  на самата опасна зона. Секое зголемување на должината на заштитениот приод над вредноста  $L_0$  не доведува до зголемување на сигурноста на постројката бидејќи ударите на гром надвор од опасната зона се безопасни за самата разводна постројка.

## 10.6. АНАЛИЗА НА ЗАШТИТАТА ОД УПАДНИ БРАНОВИ НА ЕДЕН КОНКРЕТЕН ПРИМЕР

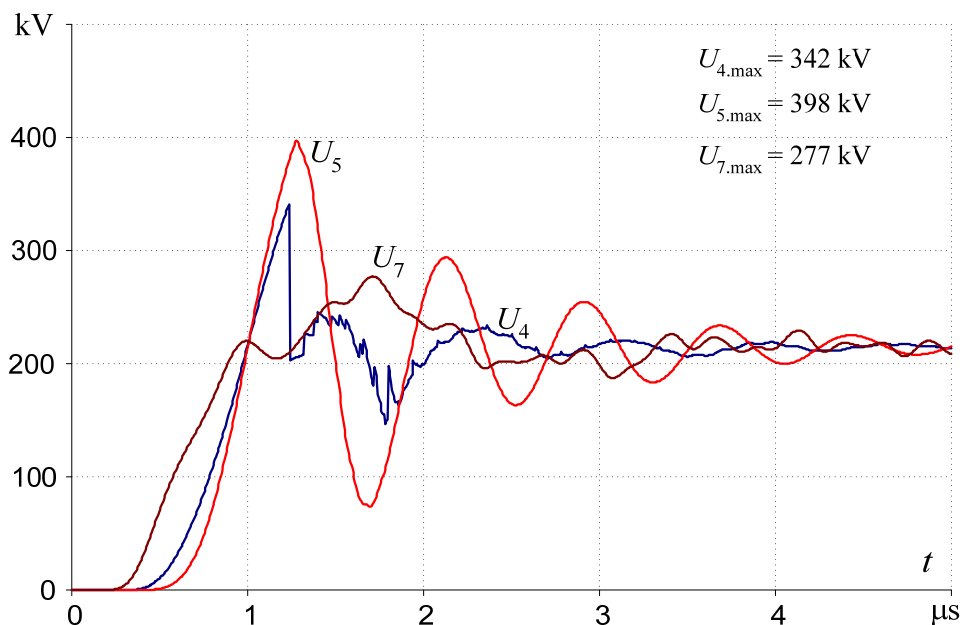


Слика 10.12. Заменска шема на РП 110/10 kV/kV "Струмица 1"

На сликата 10.12 е прикажана заменската шема од една 110 kV постојна трансформаторска станица (ТС 110/10 kV/kV "Струмица 1") потребна за анализа на брановите преодни процеси до кои доаѓа при упад на бран од атмосферско потекло во постројката по некој од приклучните водови. Во неа сите должини се изразени во (m) а капацитетите на одделите апарати, во (pF). Приклучните водови како и сите врски во постројката имаат бранова импеданција  $Z = 400 \Omega$ . Одводниците на пренапони се класични SiC одводници од типот VOP 105, 10 kA. Напонот на реагирање на чело на одводниците изнесува  $U_{reag} = 342 \text{ kV}$ , а нивната волт-амперна карактеристика може да се опише со следниот аналитички израз:

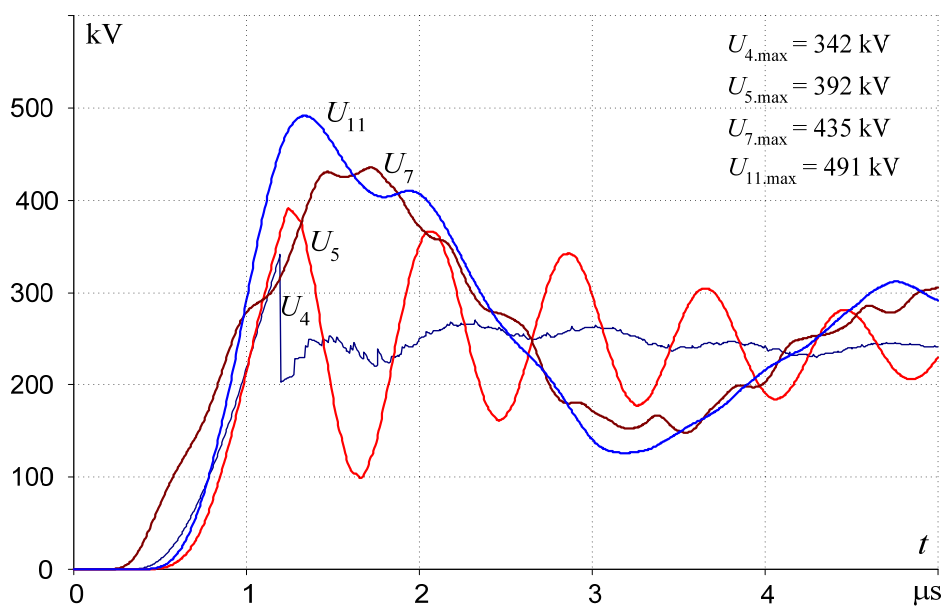
$$U_{od} = C \cdot I_{od}^{\alpha}; \quad C = 217,5 \text{ kV}; \quad \alpha = 0,1525; \quad U \text{ (kV)}; \quad I \text{ (kA)}.$$

На сликата 10.13а се прикажани пресметаните временски текови на напонот на главните собирници  $U_7$ , напонот на одводникот  $U_4$  и напонот  $U_5$  на енергетскиот трансформатор при упад на бран со амплитуда  $U_m = 620 \text{ kV}$  и стрмнина  $S = 1000 \text{ kV}/\mu\text{s}$ . На сликата 10.13б, пак, се прикажани временските текови на напоните во истите точки но за случајот кога водот V2 како и вториот енергетски трансформатор заедно со вториот одводник се исклучени заради ремонт или поправка, што претставува најнеповолна вклопна состојба на постројката од аспект на пренапоните поради упадни бранови. Во последниов случај од шемата се исклучуваат гранките 9–10, 11–12 и 12–13, заедно со капацитетите во јазлите 9, 11 и 13 како и одводникот во јазелот 12.



Слика 10.13а. Временски текови на напоните во ТС 110/10 kV/kV "Струмица 1".

Легенда:  $U_4$  – напон на одводникот;  $U_5$  – напон на трансформаторот;  
 $U_7$  – напон на собирниците

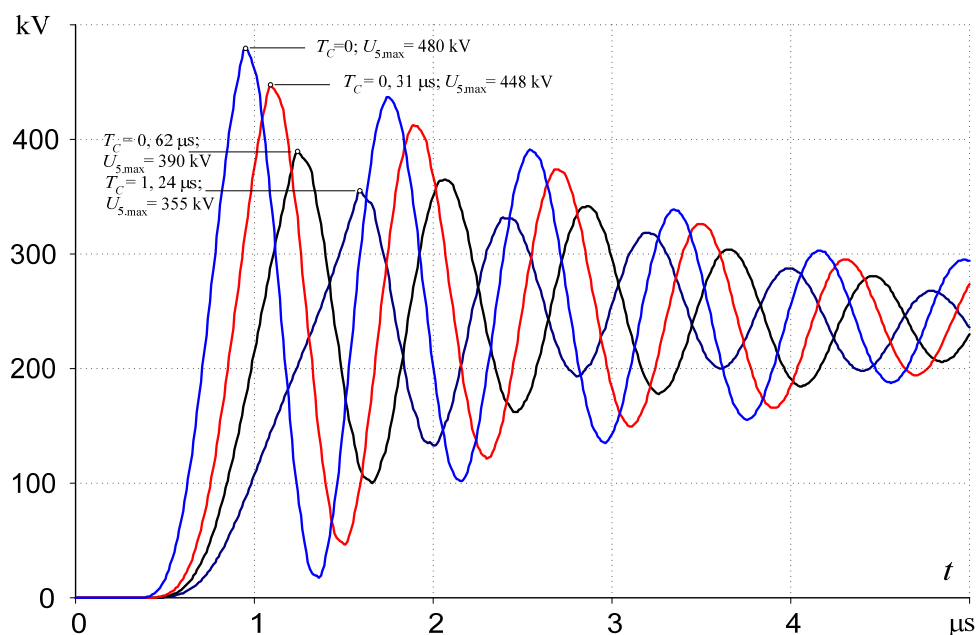


Слика 10.13б. Временски текови на напоните во ТС 110/10 kV/kV "Струмица 1".

Вклопна состојба со исклучени V2, TR 2 и вториот одводник на пренапони  
Легенда:  $U_4$  – одводник;  $U_5$  – графо TR 1;  $U_7$  – собирници;  $U_{11}$  – напон на прекинувачот во т.11

На сликата 10.14 е прикажан обликот на кривата на напонот на трансформаторот TR 1,  $U_5(t)$ , за четири разни параметри на упадниот бран: 1)  $U_m = 620 \text{ kV}$  и  $T_C = 0 \text{ ms}$ ; 2)  $U_m = 620 \text{ kV}$  и  $T_C = 0,31 \mu\text{s}$ ; 3)  $U_m = 620 \text{ kV}$  и  $T_C = 0,62 \mu\text{s}$  и 4)  $U_m = 620 \text{ kV}$  и  $T_C = 1,24 \mu\text{s}$ .





**Слика 10.14. Временски текови на напоните на TR 1 во РП 110/10 kV/kV "Струмица 1" за упаден бран со амплитуда  $U_m=620$  kV и разни времиња на чело:  $0 \mu\text{s}$ ;  $0,31 \mu\text{s}$ ;  $0,62 \mu\text{s}$  и  $1,24 \text{ ms}$**

Гледаме дека бранот бр 1, со најголема (т.е. бесконечна) стрмнина е најопасен бидејќи произвикува најголем пренапон. Ако како критериум за допуштени импулсни напони на енергетските трансформатори во таа постројка се усвои кривата од сл. 10.1 со дозволен импулсен напон со  $U_{doz} = 450$  kV, тогаш тој бран ќе предизвика пробив на главната изолација на трансформаторот TR 1. Останатите бранови во тој случај нема да бидат опасни.

## ЗАДАЧИ

**Задача 3.10.1.** На сликата 10.12 е прикажана заменската шема на трансформаторската станица TC 110/10 kV/kV "Струмица", формирана заради анализа на брановите преодни процеси во неа при упад на бран од атмосферско потекло по некој од приклучните водови. Упадниот бран има косо чело и рамен грб со позната амплитуда  $U_m = 620$  kV и време на чело  $T_C = 0,62 \mu\text{s}$ , упаѓа во постројката по приклучниот вод V1.

Со помош на програмата "RP Strumica.xls" да се направи анализа на временските текови на напоните во сите точки од постројката при упад на зададениот упаден бран Врз основа на таквите анализи да се утврдат максималните вредности на напоните што ќе се појават во поедините точки од постројката со цел да се утврди дали ќе дојде до пробив или прескок на некој од апаратите во постројката или на некој од енергетските трансформатори, приклучени во точките 5 и 13. Одводниците се од типот VOP 105/10 kA. За нив се познати следните карактеристики:  $U_{reag} = 342$  kV;  $U_{od} = C \cdot i_{od}^\alpha$ ;  $C = 217,5$  kV;  $\alpha = 0,1525$ .

Резултатите од пресметките на максималните вредности на пренапоните,  $U_{i,max}$ ;  $i=1,15$ ), да се сместат во табелата 3.10.1.

**Табела 3.10.1. Резултати од пресметките на темените вредности на напоните во постројката**

Точка $i$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
$U_{i,max}$ (kV)															

Да се прикажат (скицираат) зависностите  $U_4(t)$  и  $U_5(t)$  на напоните на одводникот и енергетскиот трансформатор TR 1 за првите 5  $\mu\text{s}$  од преодниот процес.

Истите анализи да се повторат и за случајот кога класичните Si-C одводници тип VOP 105/10 kA во постројката се заменат со ZnO одводници чиј што напон на реагирање е  $U_{\text{reag}}=0$  а нивната волт-амперна карактеристика  $U_{\text{od}}=C \cdot i_{\text{od}}^\alpha$  ги има следните параметри:  $C=260$  kV;  $\alpha=0,03$ .

Пробив односно прескок на изолацијата кај поедините апарати во постројката (разделувачи, прекинувачи, мерни трансформатори и сл.) настанува ако напонот  $U(t)$  на апаратот во било кој момент го надмине нивниот поднослив импулсен напон кој изнесува  $U_{\text{podn.}} = 550$  kV. За трансформаторите TR 1 и TR 2 треба да се применува критериумот според кривата  $U_d(t)$  од сл. 10.1, каде што  $U_{\text{doz}} = 450$  kV.

■ ■ ■

**Задача 3.10.2.** Се посматра удар на гром во столб од приклучниот надземен вод V1 кој што се наоѓа на растојание  $x$  од постројката од претходната задача. Отпорноста на распростирање на заземјувачот на столбот изнесува  $R_{st}$ , а амплитудата на струјата на громот е  $I_m$ . На местото на ударот на громот доаѓа до појава на повратен прескок после кое на спроводникот каде што настанал прескокот се формира напонски бран со бесконечно стрмно чело и со амплитуда  $U_m = R_{st} \cdot I_m$ . Да се пресмета:

- Колкаво ќе биде челото на бранот кој по изминатиот пат од  $x$  метри ќе дојде на влезот на постројката. дали овој бран ќе биде опасен за изолацијата на трансформаторот TR 1;
- На првиот столб од водот V1, (т.е. во точката бр. 1 од шемата на сл. 3.10.1) пред самиот влез во постројката, се поставува заштитно искриште со снижено изолационо ниво, чија што волт-секундна карактеристика може да се опише со следната релација:

$$U_{50\%}(t) = K_1 + K_2 / t^{0.75} = 250 + 500 / t^{0.75} \text{ (kV)}; \quad U_{50\%} \text{ (kV)}; \quad t \text{ (\mu s)}.$$

Да се утврди дали ќе дојде воопшто до прореагирање на тоа искриште, т.е. дали воопшто ќе дојде до отсекување на упадниот бран и кога ќе се случи тоа. Дали таквиот отсечен бран ќе биде опасен за изолацијата на на трансформаторот TR 1;

- Да се даде приказ на напоните  $U_4(t)$  и  $U_5(t)$  на одводникот и на енергетскиот трансформатор TR 1 за првите 5  $\mu\text{s}$  од преодниот процес во случајот под б) доколку се случи искриштето да прореагира.

Сите пресметки да се направат со помош на програмата "RP Strumica.xls".

**Бројни вредности:**  $x = 360$  m;  $R_{st} = 10,0$   $\Omega$ ;  $I_m = 80$  kA.

■ ■ ■

## 11. НУМЕРИЧКА ПОСТАПКА ЗА РЕШАВАЊЕ НА ПРЕОДНИ ПРОЦЕСИ ВО КОЛА СО КОНЦЕНТРИРАНИ ПАРАМЕТРИ

### 11.1 ВОВЕД

Кога во едно електрично коло ќе дојде до промена на неговата вклопна состојба (комутација), по комутацијата во колото ќе настане преоден процес којшто трае релативно кусо време после кое во него доаѓа до нова стационарна состојба.

Комутациите во електроенергетските системи предизвикуваат, исто така, преодни процеси кои можат да бидат проследени со појава на т.н. „комутациони пренапони“. Комутационите пренапони во електроенергетските кола може да се решаваат на тој начин што елементите на тие кола се претставуваат како елементи со концентрирани параметри. На тој начин се формира модел на анализираното коло, за кој, користејќи ги основните закони на електротехниката, се пишува систем интегро-диференцијални равенки. Потоа се применува некоја постапка за решавање на така формираните систем интегро-диференцијални равенки, при што, во денешно време, за таа цел најчесто се применува некоја нумеричка постапка.

Како резултат на овие пресметки се добиваат временските текови на сите напони и струи со коишто се опишува преодниот процес.

Во оваа поглавје ќе биде прикажана една нумеричка постапка за решавање на системот интегро-диференцијални равенки со коишто се опишуваат временските текови во линеарните електрични кола за време на преодниот процес. Постапката е општа и важи за секое линеарно електрично коло без оглед на бројот и видот на неговите елементи и неговата топологија. Постапката базира на примената на познатото „трапезно правило“ за нумеричка интеграција.

Притоа, во колото–модел секој кондензатор или индуктивен елемент се претставува со редна врска на еден отпорник (резистор) и еден напонски генератор чиј напон зависи од состојбата со напоните и струите во „минатото“. На тој начин, за едно коло составено од отпорници, индуктивни елементи и кондензатори (скратено RLC коло) се формира заменско коло составено само од отпорници и напонски генератори. Отпорностите на отпорниците во заменското коло се константни, т.е. временски непроменливи, додека, пак, напоните на напонските генератори, што се јавуваат како резултат од таквиот начин на еквивалентирање, се временски променливи и зависат од состојбата со напоните и струите во минатото.

Иако преодниот процес е континуиран, во оваа постапка вредностите на непознатите напони и струи во колото се пресметуваат во дискретни временски моменти  $t = \Delta t$ ,  $t = 2\Delta t$ ,  $t = 3\Delta t$  итн. при што велиме дека процесот се дискретизира. Во заменските кола состојбата во даден момент  $t_k = k \cdot \Delta t$  се пресметува врз основа на познатите моментни вредности на надворешните екситации и врз основа на познатата состојба во колото во моментот  $t - \Delta t$ .

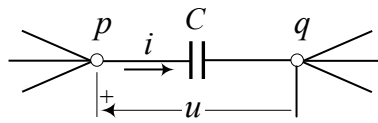
Точноста на добиените резултати зависи од брзината со којашто се одвиваат набљудуваните преодни процеси, но зависи и од големината на избраниот временски чекор  $\Delta t$ . Со правилен избор на доволно мал чекор,  $\Delta t$ , е можно да се добијат резултати со прифатлива точност.

## 11.2 МОДЕЛИРАЊЕ НА КОНДЕНЗАТОРИ И ИНДУКТИВНИ ЕЛЕМЕНТИ

### 11.2.1 Моделирање на кондензатор

На сликата 11.1 е прикажан еден кондензатор со капацитет  $C$  којшто претставува дел од едно електрично коло коешто работи во преоден режим. Со  $p$  и  $q$  се означени индексите на јазлите помеѓу кои е приклучен кондензаторот. Јазелот  $p$  ќе го сметаме за почетен јазел, а јазелот  $q$  за краен јазел. Нека со  $u(t)$  го означиме напонот помеѓу тие два јазла во било кој момент  $t$ , т.е.  $u(t) = \varphi_p(t) - \varphi_q(t)$ , каде со  $\varphi_p(t)$  и  $\varphi_q(t)$  се означени потенцијалите на почетниот и крајниот јазел, соодветно. Со  $i(t)$  ќе ја означиме струјата на кондензаторот во моментот  $t$ , со референтна насока од јазелот  $p$  кон јазелот  $q$ , како на сликата 11.1. Тогаш може да пишуваме:

$$i(t) = C \cdot \frac{du(t)}{dt}. \quad (11.1)$$



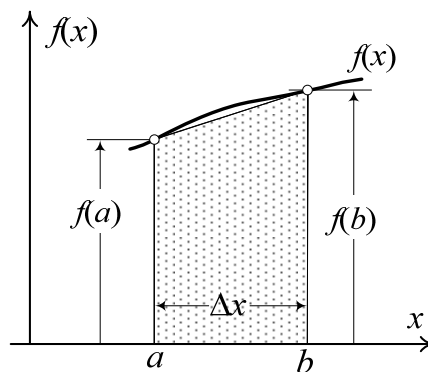
Слика 11.1. Кондензатор како елемент од едно електрично коло

Нека ја интегрираме релацијата (11.1) во интервалот од  $t-\Delta t$  до  $t$ . Тогаш ќе имаме:

$$\int_{t-\Delta t}^t i(t) \cdot dt = C \cdot \int_{t-\Delta t}^t \frac{du(t)}{dt} dt \equiv C \cdot u(t) - C \cdot u(t-\Delta t). \quad (11.2)$$

Интегралот на левата страна од (11.2) ќе го решиме приближно применувајќи го познатото трапезно правило за интеграција. Според ова правило определениот интеграл од некоја произволна функција  $f(x)$  во даден интервал  $(a, b)$  со релативно мала ширина  $\Delta x = b - a$ , е приближно еднаков на плоштината на трапезот формиран со паралелните страници  $f(a)$  и  $f(b)$ , според сликата 11.2, т.е. може да се користи:

$$\int_a^b f(x) \cdot dx \approx \frac{f(a) + f(b)}{2} \cdot (b - a). \quad (11.3)$$



Слика 11.2. Трапезно правило за приближна нумеричка интеграција

На тој начин, ставајќи во (11.2)  $a \equiv t-\Delta t$  и  $b \equiv t$ ,  $b-a = t - (t-\Delta t) = \Delta t$ , како и  $f(x) \equiv i(t)$ , со примена на трапезното правило (11.3), ќе добиеме:

$$\int_{t-\Delta t}^t i(t) \cdot dt \approx \frac{i(t-\Delta t) + i(t)}{2} \cdot \Delta t. \quad (11.4)$$

Врз основа на релацијата (11.2) сега можеме да пишуваме:

$$\frac{i(t) + i(t-\Delta t)}{2} \cdot \Delta t = C \cdot [u(t) - u(t-\Delta t)], \quad (11.5)$$

од каде што се добива следниот израз:

$$u(t) - R_C \cdot i(t) = u(t-\Delta t) + R_C \cdot i(t-\Delta t), \quad (11.6)$$

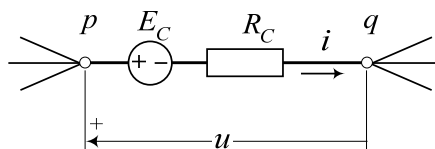
Во релацијата (11.6) е воведена ознаката:

$$R_C = \frac{\Delta t}{2C}, \quad (11.7)$$

која има природа на отпорност. Ако понатаму ја воведеме ознаката:

$$E_C(t) = u(t-\Delta t) + R_C \cdot i(t-\Delta t), \quad (11.8)$$

тогаш врз основа на (11.6), кондензаторот од сликата 11.1 може да се претстави со заменска шема како на сликата 11.3. Како што се гледа од сликата 11.3, кондензаторот може да се претстави со редна врска од отпорник со константна отпорност  $R_C$  и напонски генератор чиј напон  $E_C$  зависи од состојбата со напонот  $u$  и струјата  $i$  на кондензаторот во „минатото“, т.е. во претходниот момент  $t-\Delta t$ .



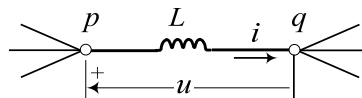
Слика 11.3. Заменска шема за кондензаторот од сликата 11.1

### 11.2.2. Моделирање на индуктивен елемент

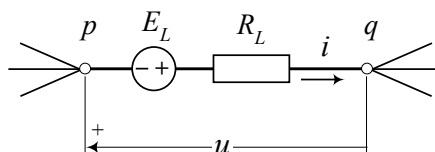
Со постапка аналогна на постапката применета во случајот кога се разгледуваше кондензатор во електричното коло, може да се покаже дека на индуктивен елемент со индуктивност  $L$ , прикажан на сликата 11.4, му соодветствува заменска шема како на сликата 11.5. Притоа се воведени следните означувања:

$$R_L = \frac{2L}{\Delta t} \quad (11.9)$$

$$E_L(t) = u(t-\Delta t) + R_L \cdot i(t-\Delta t). \quad (11.10)$$



Слика 11.4. Индуктивен елемент како елемент од едно електрично коло



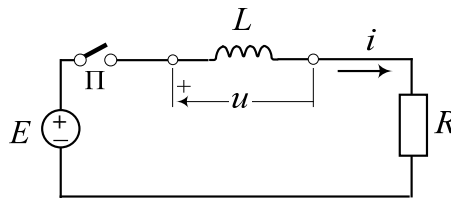
Слика 11.5. Заменска шема за индуктивниот елемент од сликата 11.4.

Значи индуктивниот елемент со индуктивност  $L$  можеме да го еквивалентираме со редна врска на напонски генератор со напон  $E_L$  и отпорник со отпорност  $R_L$ , при што важи следната релација:

$$u(t) - R_L \cdot i(t) = -E_L(t) \equiv -[u(t - \Delta t) + R_L \cdot i(t - \Delta t)]. \quad (11.11)$$

**Пример П11.1.** Нека го пресметаме временскиот тек на струјата  $i(t)$  во колото од сликата П11.1. Колото е составено од редна врска на индуктивен елемент со индуктивност  $L = 0,1$  Н и отпорник со отпорност  $R = 10 \Omega$ . Напонот на независниот напонски генератор е константен,  $E = 12$  V. Во моментот  $t = 0$  се затвора прекинувачот П. Пред неговото вклучување системот бил без енергија, т.е. почетните услови за напонот и струјата на калемот биле:  $i(0^+) = 0$ ;  $u(0^+) = E - R \cdot i(0^+) = E = 12$  V .

Решение:

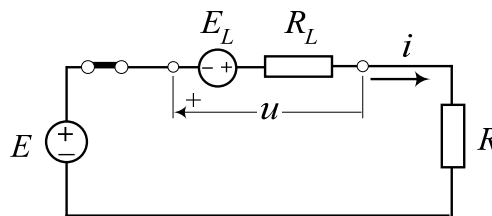


Слика П11.1. Редно RL коло без енергија кое се вклучува на независен напонски генератор

Решавањето на преодниот процес во колото по затворањето на прекинувачот П значи определување на временските текови на напонот  $u(t)$  и струјата  $i(t)$ . Кај нумеричкото решавање преодниот процес се дискретизира, т.е. се посматра само во определен број временски моменти. Ние ќе ја решаваме состојбата во колото за дискретните моменти  $\Delta t, 2 \Delta t, 3 \Delta t$  итн. т.е. во дискретните моменти  $t_k = k \cdot \Delta t$  ( $k = 1, 2, 3, \dots$ ), сè додека не се воспостави новиот стационарен режим.

Нека за временски чекор, со којшто ќе го решаваме преодниот процес, усвоиме  $\Delta t = 0,005$  s. Ако индуктивниот елемент со индуктивност  $L$  го прикажеме со неговата заменска шема како на сликата 11.5, за колото од сликата П11.1 ќе се формира заменско коло како на сл. П11.2. Притоа е:

$$R_L = \frac{2L}{\Delta t} = \frac{2 \cdot 0,1}{0,005} = 40 \Omega; \quad E_L(t) = u(t - \Delta t) + R_L i(t - \Delta t); \quad i(0^+) = 0.$$



Слика П11.2. Заменско коло на колото од сликата П11.1

За колото од сликата П11.2 за секој момент на време,  $t$ , важат следните релации:

$$i(t) = \frac{E(t) + E_L(t)}{R_L + R};$$

$$u(t) = R_L \cdot i(t) - E_L(t).$$

Според тоа, нумеричката постапка за пресметување на вредностите на напонот  $u(t)$  и струјата  $i(t)$  на индуктивниот елемент ќе содржи:

$$k=0; t=0; i(0)=0; u(0)=E-R \cdot i(0)=E; E_L(\Delta t)=u(0)+R_L \cdot i(0)=E \equiv 12 \text{ V};$$

$$k=1; t=\Delta t; E_L(t)=u(0)+R_L \cdot i(0)=12+0=12 \text{ V};$$

$$i(t)=\frac{E(t)+E_L(t)}{R_L+R}=\frac{12+12}{40+10}=0,48 \text{ A};$$

$$u(t)=R_L \cdot i(t)-E_L(t)=40 \cdot 0,48-12=7,2 \text{ V};$$

$$k=2; t=2\Delta t; E_L(t)=u(\Delta t)+R_L \cdot i(\Delta t)=7,2+40 \cdot 0,48=26,4 \text{ V};$$

$$i(t)=\frac{E(t)+E_L(t)}{R_L+R}=\frac{12+26,4}{40+10}=0,768 \text{ A};$$

$$u(t)=R_L \cdot i(t)-E_L(t)=40 \cdot 0,768-26,4=4,32,2 \text{ V};$$

итн.

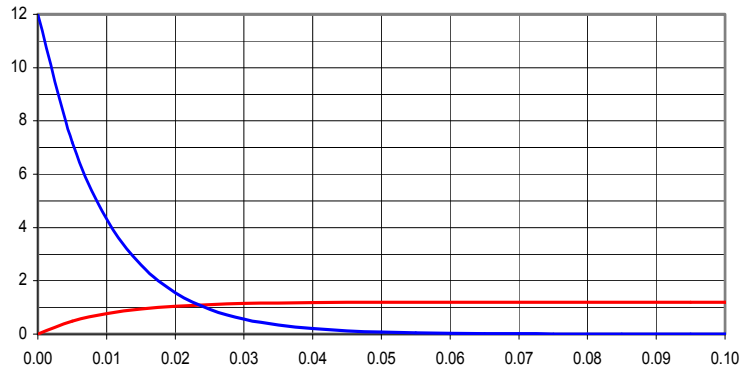
Резултатите од пресметките на временските текови на напонот  $u(t)$  и струјата  $i(t)$  се дадени во табелата П11.1. Во истата табела се прикажани и точните вредности  $u_T(t)$  и  $i_T(t)$  за овие величини, пресметани со помош на познатите егзактни формули:

$$i_T(t)=\frac{E}{R} \cdot (1-e^{-\frac{R}{L}t}); \quad u_T(t)=E \cdot e^{-\frac{R}{L}t}. \quad (\text{П11.1})$$

Табела П11.1. Решение на преодниот процес

$k$	$t$	$i(t)$	$u(t)$	$E_L$	$i_T(t)$	$u_T(t)$
0	0.0000	0.000	12.000	12.000	0.000	12.000
1	0.0050	0.480	7.200	26.400	0.472	7.278
2	0.0100	0.768	4.320	35.040	0.759	4.415
3	0.0150	0.941	2.592	40.224	0.932	2.678
4	0.0200	1.044	1.555	43.334	1.038	1.624
5	0.0250	1.107	0.933	45.201	1.101	0.985
6	0.0300	1.144	0.560	46.320	1.140	0.597
7	0.0350	1.166	0.336	46.992	1.164	0.362
8	0.0400	1.180	0.202	47.395	1.178	0.220
9	0.0450	1.188	0.121	47.637	1.187	0.133
10	0.0500	1.193	0.073	47.782	1.192	0.081
11	0.0550	1.196	0.044	47.869	1.195	0.049
12	0.0600	1.197	0.026	47.922	1.197	0.030
13	0.0650	1.198	0.016	47.953	1.198	0.018
14	0.0700	1.199	0.009	47.972	1.199	0.011
15	0.0750	1.199	0.006	47.983	1.199	0.007
16	0.0800	1.200	0.003	47.990	1.200	0.004
17	0.0850	1.200	0.002	47.994	1.200	0.002
18	0.0900	1.200	0.001	47.996	1.200	0.001
19	0.0950	1.200	0.001	47.998	1.200	0.001
20	0.1000	1.200	0.000	47.999	1.200	0.001

На сликата П11.3 е даден графичкиот приказ на пресметаните  $u(t)$  и  $i(t)$  за колото од сликата П11.1.



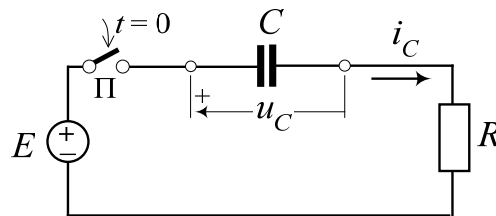
Слика П11.3. Графички приказ на величините  $u(t)$  и  $i(t)$  за колото од сликата П11.1

**Задача 311.1.** Да се пресметаат временските текови на струјата  $i_c(t)$  и напонот  $u_c(t)$  во колото од сликата 311.1.1. Колото е составено од редна врска на кондензатор со капацитет  $C = 100 \mu\text{F}$  и отпорник со отпорност  $R = 100 \Omega$ . Во моментот  $t = 0$  се затвора прекинувачот П со што во колото се вклучува независен напонски генератор со константен напон  $E = 12 \text{ V}$ . Пред неговото вклучување кондензаторот не содржал енергија така што почетните вредности за напонот и струјата на кондензаторот се:

$$u(0^+) = 0; \quad i(0^+) = [E - u(0^+)]/R = 0,12 \text{ A}.$$

Пресметките да се направат со временски чекор  $\Delta t = 0,001 \text{ s}$ , за интервал  $0 - 0,004 \text{ s}$ . Резултатите добиени со помош на нумеричката постапка да се споредат со вредностите коишто се добиваат со помош на познатите решенија во затворена форма:

$$u_c(t) = \frac{E}{R} \cdot (1 - e^{-\frac{t}{RC}}); \quad i_c(t) = \frac{E}{R} \cdot e^{-\frac{t}{RC}}. \quad (311.1)$$



Слика 311.1.1. Редно RC коло без енергија кое се вклучува на независен напонски генератор

**Напатствије.** Постапката за пресметување на напонот и струјата на кондензаторот го содржи следново:

$$R_c = \frac{\Delta t}{2C} = \frac{0,001}{2 \cdot 100 \cdot 10^{-6}} = 5 \Omega; \quad u_c(0) = 0;$$

$$k=0; \quad t=0; \quad u_c(0) = 0; \quad i_c(0) = \frac{E(0^+) - u_c(0)}{R} = 0,12 \text{ A};$$

$$k=1; \quad t = \Delta t; \quad E_c(t) = u_c(0) + R_c \cdot i_c(0) = 0 + 5 \cdot 0,12 = 0,6 \text{ V};$$

$$i_c(t) = \frac{E(t) - E_c(t)}{R_c + R} = \frac{12 - 0,6}{5 + 100} = 0,1086 \text{ A};$$

$$u_c(t) = R_c \cdot i_c(t) + E_c(t) = 5 \cdot 0,1086 + 0,6 = 1,1429 \text{ V};$$



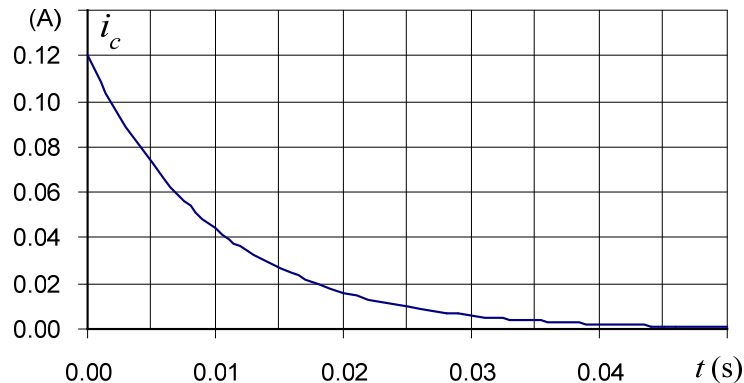
$$k=2; \quad t=2\Delta t; \quad E_C(t) = u_C(\Delta t) + R_C \cdot i_C(\Delta t) = 1,2 + 5 \cdot 0,12 = 1,6857 \text{ V};$$

$$i_C(t) = \frac{E(t) - E_C(t)}{R_C + R} = \frac{12 - 1,6857}{5 + 100} = 0,1034 \text{ A};$$

$$u_C(t) = R_C \cdot i_C(t) + E_C(t) = 5 \cdot 0,1034 + 1,6857 = 2,2027 \text{ V};$$

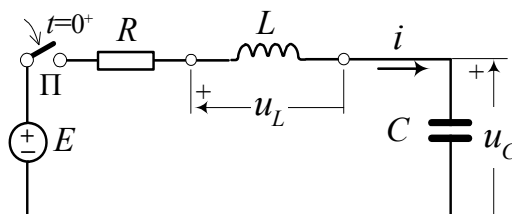
.....

Ако за пресметка на струјата на кондензаторот се користи дадената равенка (311.1) ќе се добијат резултати чиј графички приказ е даден на сликата 311.1.2.



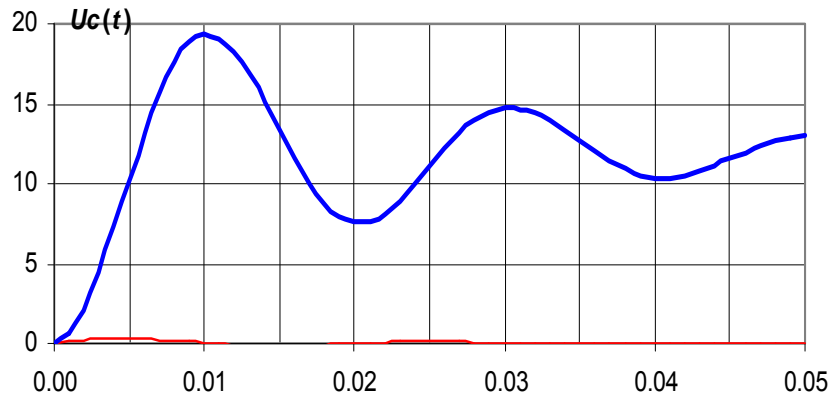
Слика 311.1.2. Зависоност  $i_c(t)$  во колото од задачата 311.1

**Задача 311.2.** Да се пресметаат временските текови на струјата  $i(t)$  и напонот  $u_C(t)$  во колото од сликата 311.2.1. Колото е составено од редна врска на отпорник со отпорност  $R = 10 \Omega$ , индуктивен елемент со индуктивност  $L = 0,1 \text{ H}$ , кондензатор со капацитет  $C = 100 \mu\text{F}$  и независен напонски генератор со константен напон  $E = 12 \text{ V}$ . Во моментот  $t = 0$  се затвора прекинувачот П. Пред неговото вклучување системот бил без енергија, така што почетните вредности за напонот и струјата на кондензаторот биле:  $u_C(0^+) = 0$  и  $i(0^+) = 0$ . Пресметките да се направат со временски чекор  $\Delta t = 0,001 \text{ s}$ , за првите  $0,005 \text{ s}$  од преодниот процес.

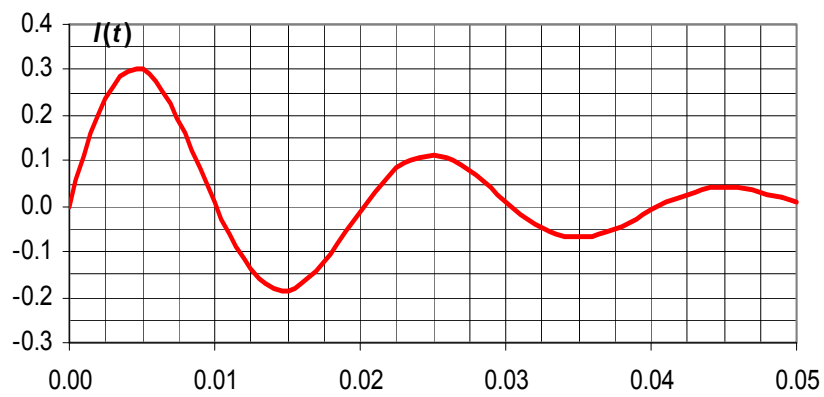


Слика 311.2.1 Редно RLC коло без енергија кое се вклучува на независен напонски генератор

Во интервалот  $0-0,05 \text{ s}$  решението за зависностите  $u_C(t)$  и  $i(t)$  е прикажано на сликите 311.2.2 и 311.2.3.



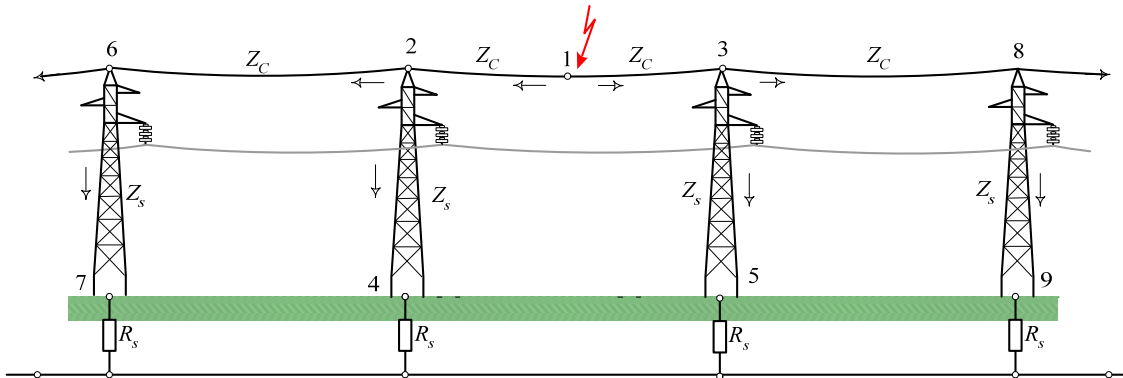
Слика 311.2.2. Зависност на напонот  $u_c(t)$  [V] во колото од сликата 311.2.1



Слика 311.2.3. Зависност на струјата  $I(t)$  [A] во колото од сликата 311.2.1

### 11.3. МОДЕЛИРАЊЕ НА УДАР НА ГРОМ ВО ЗАШТИТНО ЈАЖЕ ВО РАСПОН

Овој проблем може едноставно да се реши со помош на претходно изложената постапка за нумеричко решавање на диференцијалните равенки, базирана на примената на трапезното правило за нумеричка интеграција. Физичкиот систем што се анализира е прикажан на сликата 11.6, каде што се прикажани само три распони од водот и тоа: погодениот распон и двата соседни распона. Натомошниот дел од водот може да се прикаже упросто, без негово автентично моделирање со каскади од елементи со два пристапа (четворополи) бидејќи се покажало дека тоа не е неопходно.



Слика 11.6. Приказ на системот што се анализира при ударот на гром во заштитното јаже

#### 11.3.1. Моделирање на заштитните јажиња и столбовите

*Заштитно јаже.* Заштитното јаже во секој распон претставува вод со должина еднаква на распонот, т.е. елемент со распределени параметри. Јажето во погодениот распон ќе се моделира со два вода, со различни должини. Но таквите водови ќе се моделираат упросто, само со соодветни индуктивности. Капацитетот на јажето спрема земја, како малку влијателен, се занемарува и нема да фигурира во неговиот модел.

Индуктивноста на јажето  $L_{zj}$  се пресметува преку познатата вредност за неговата карактеристична (бранова) импеданција  $Z_{zj}$  и познатата брзина на простирање на брановите во вакуум  $v_0$ :

$$Z_{zj} = 60 \cdot \ln \left( \frac{2h_{zj,cp}}{d_{zj}} \right); \quad v_0 = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \cdot \epsilon_0}} = 300 \frac{\text{m}}{\mu\text{s}}; \quad L_{zj} = \frac{Z_{zj}}{v_0}. \quad (11.12)$$

Во релациите (11.12) со  $h_{zj,cp}$  е означена средната височина на заштитното јаже над земјата, додека со  $d_{zj}$  е означен неговиот пречник.

*Столбови.* Столбовите, исто како и заштитните јажиња, претставуваат водови, т.е. елементи со распределени параметри. Но и тие при нивното моделирање ќе се претставуваат само со својата индуктивност. Според тоа, за столбовите ќе важат равенствата:

$$Z_{st} = 60 \cdot \ln \left( \frac{4h_{st}}{d_{ek}} - 1 \right); \quad d_{ek} = \sqrt{\frac{4}{\pi} a_{ek} \cdot b_{ek}}; \quad v = 0,85 \cdot v_0 = 255 \frac{\text{m}}{\mu\text{s}}; \quad L_{st} = \frac{Z_{st}}{v}. \quad (11.13)$$

Во (11.13) со  $Z_{st}$ ,  $h_{st}$  и со  $d_{ek}$  се означени брановата импеданција, височината и „еквивалентниот пречник“ на столбот, со  $a_{st}$  и  $b_{st}$  се означени димензиите на столбот во неговата основа и со  $L_{st}$  е означена индуктивноста на столбот.

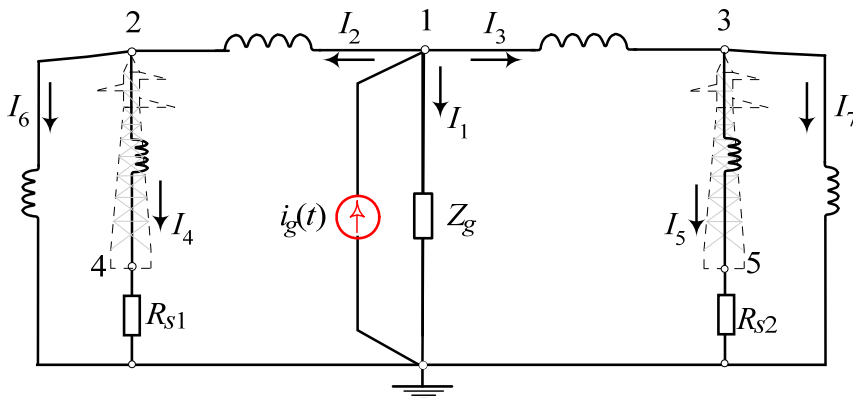
### 11.3.2. Моделирање на ударот на громот

*Гром.* Громот ќе се моделира со паралелна комбинација од независен струен генератор чијашто струја  $i_g(t)$  го опишува временскиот тек на самиот струен импулс и отпорник чија отпорност е еднаква на импеданцијата на каналот на громот,  $Z_g$ . Овој струен генератор, заедно со импеданцијата на каналот на громот  $Z_g$ , се приклучува на местото на ударот на громот (на пр. точката бр. 1 на сликата 11.6).

За струјниот импулс најчесто се усвојува дека има облик на косоаголен бран со позната константна стрмнина  $S = di_g/dt$ , познато времетраење на челото,  $\tau$ , и позната амплитуда  $I_m$ . Обично се усвојува дека струјниот бран има рамен грб. Параметрите на громот, т.е. вредностите  $S$ ,  $\tau$  и  $I_m$  претставуваат случајни величини коишто подлежат на некаков веројатносен закон на распределба. Импеданцијата на каналот на громот ( $Z_g$ ) зависи од големината на амплитудата  $I_m$ . Значи и таа има, исто така, случајна вредност. Обично за малите струи на громот импеданцијата на каналот на громот има големи вредности коишто се движат помеѓу 1000 и 3000  $\Omega$ , додека за струите што најчесто се јавуваат таа е десетина пати помала и нејзината вредност се движи во интервалот од 100 до 300  $\Omega$ .

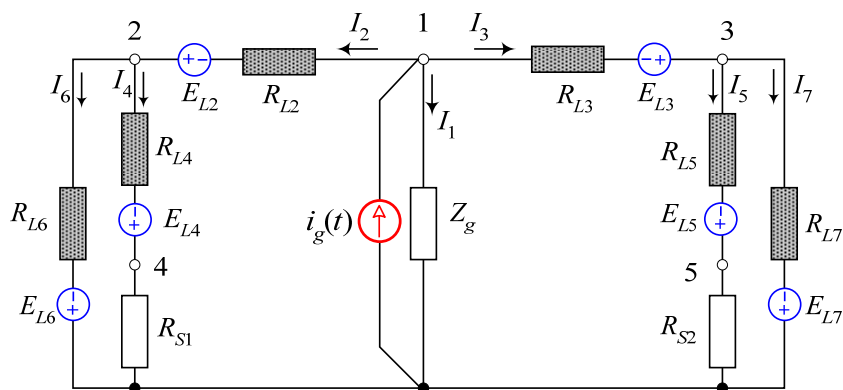
### 11.3.3. Моделирање на системот од сликата 11.6

На сликата 11.7 е прикажан поедноставен модел на системот од сликата 11.6. Во него секој столб е претставен со својата индуктивност  $L_{st}$  и секоја секција од заштитното јаже на погодениот распон е претставена со својата индуктивност. Заземјувачите на столбовите се претставуваат со своите импулсни (ударни) отпорности на распостирање  $R_{st}$ . Распонот лево од столбот број 2 се претставува упросто, само преку индуктивноста на јажето во тој распон, во којашто е вклучена и индуктивноста на столбот бр. 6, без притоа да се земе предвид неговиот заземјувач ниту пак преостанатите распони лево од столбот бр. 6. Аналогно се претставуваат и распоните десно од столбот бр. 3. Ударот на громот е моделиран со паралелна комбинација од отпорник со отпорност  $Z_g$  и струен генератор со струја  $i_g(t)$  кои се приклучени помеѓу местото на ударот (точка 1) и земјата. На тој начин се доаѓа до моделот прикажан на сликата 11.7.



Слика 11.7. Модел на системот од сликата 11.6

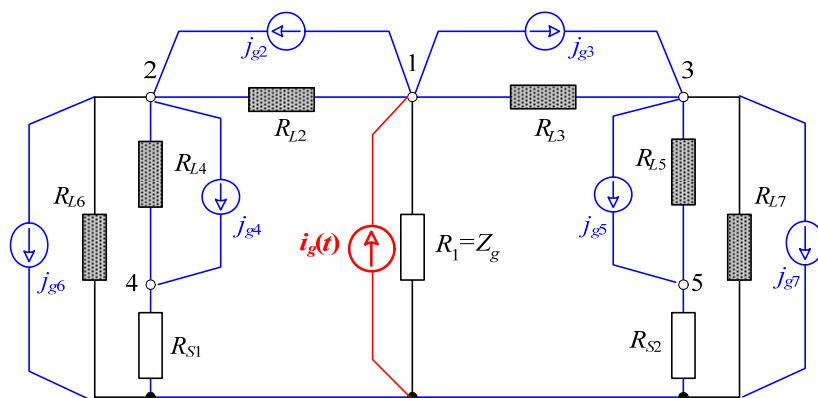
Врз основа на овој модел е формирано соодветно заменско коло, прикажано на сликата 11.8. Во него секој индуктивен елемент од моделот на сликата 11.7 е моделиран со еден напонски генератор и еден отпорник (според моделирањето прикажано на сликата 11.5). На сликата 11.8 отпорниците (со отпорностите  $R_{Li}$ ), коишто произлегуваат од моделирањето на индуктивните елементи, се прикажани со зацрнети правоаголници, додека напонските генератори од соодветните модели се прикажани со сина боја.



Слика 11.8. Заменско коло на моделот од слика 11.7

### 11.3.3. Нумеричко решавање на заменското коло

Во електричното коло прикажано на сликата 11.8 се познати отпорностите на сите отпорници и струјата на независниот струен генератор со кој се моделира громот. Напоните на напонските генератори се пресметуваат во текот на предниот процес, врз основа на определените напони и струи во претходниот чекор. Кога во моментот  $t$  се познати напоните на сите напонски генератори и струјата на струјниот генератор во колото од сликата 11.8, со соодветна пресметка можат да се определат вредностите на сите напони  $u(t)$  и струи  $i(t)$ . Тоа може да се направи со примена на разни методи, но како доста погоден за автоматизирано пресметување со помош на компјутер се покажал методот на независни напони. За да го примениме тој метод е потребно напонските генератори (прикажани на сликата 11.8) да се ги трансформираме во еквивалентни струјни генератори, како што е прикажано на сликата 11.9.



Слика 11.9. Коло од сликата 11.8 по трансформирање на напонските генератори во струјни

Според методот на независни напони, непознатите напони на јазлите на колото можат да се определат по пат на решавање систем линеарни равенки кои можат да се напишат во матричен облик:

$$\mathbf{G} \cdot \mathbf{U} = \mathbf{J}. \quad (11.14)$$

Во равенката (11.14) квадратната матрица  $\mathbf{G}$  е матрица на спроводливостите на независните јазли, формирана за избран референтен јазел. При решавање на овој вид проблеми е вообичаено како референтен јазел да се зема земјата. Елементот на векторот  $\mathbf{U}$  во редицата  $k$ ,  $u_k$ , е еднаков на напонот на јазелот  $k$  (во однос на референтниот јазел). Елементот на векторот  $\mathbf{J}$  во редицата  $k$ ,  $j_k$ , е струја на еквивалентниот струен генератор на јазелот  $k$ .

Во натамошното излагање ќе биде објаснето како се определуваат елементите на матрицата  $\mathbf{G}$  и на векторот  $\mathbf{J}$ .

*а) Формирање на матрицата  $\mathbf{G}$*

Кога во разгледуваното коло сите пасивни елементи се отпорници (како што е тоа случај кај колото прикажана на сликата 11.9) елементите на матрицата  $\mathbf{G}$  можат едноставно да се определат со инспекција (набљудување) на колото. Притоа, за определување на елементите на матрицата важат следниве правила:

- дијагоналниот елемент  $G_{ii}$  (што се наоѓа во пресекот на  $i$ -тата редица и  $i$ -тата колона) е еднаков на сума на спроводливостите на сите отпорници коишто се врзани за  $i$ -тиот јазел;
- вондијагоналниот елемент  $G_{ij}$  (што се наоѓа во пресекот на  $i$ -тата редица и  $j$ -тата колона) е еднаков на негативната спроводливост на отпорникот што директно ги поврзува јазлите  $i$  и  $j$ ; доколку јазлите  $i$  и  $j$  се директно поврзани со два или повеќе паралелни отпорници тогаш елементот  $G_{ij}$  е еднаков на негативната сума на спроводливостите на тие отпорници и
- вондијагоналниот елемент  $G_{ij}$  е еднаков на нула ако нема отпорници што директно ги поврзуваат јазлите  $i$  и  $j$ .

Со помош на наведените правила, за матрицата на спроводливостите на независните јазли на колото од сликата 11.9 се добива:

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} R_1^{-1} + R_{L2}^{-1} + R_{L3}^{-1} & -R_{L2}^{-1} & -R_{L3}^{-1} & 0 & 0 \\ -R_{L2}^{-1} & R_{L2}^{-1} + R_{L4}^{-1} + R_{L6}^{-1} & 0 & -R_{L4}^{-1} & 0 \\ -R_{L3}^{-1} & 0 & R_{L3}^{-1} + R_{L5}^{-1} + R_{L7}^{-1} & 0 & -R_{L5}^{-1} \\ 0 & -R_{L4}^{-1} & 0 & R_{L4}^{-1} + R_{S1}^{-1} & 0 \\ 0 & 0 & -R_{L5}^{-1} & 0 & R_{L5}^{-1} + R_{S2}^{-1} \end{bmatrix}.$$

*б) Пресметка на напоните на напонските генератори  $E_{Li}$*

Според релациите (11.9) и (11.10) и моделот од сликата 11.5, за секој индуктивен елемент  $i$  се определуваат:

$$R_{Li} = \frac{2L_i}{\Delta t} \quad \text{и} \quad E_{Li} = u_{Li}(t - \Delta t) + R_{Li} \cdot i_i(t - \Delta t).$$

Колото од сликата 11.8 има вкупно  $m = 9$  гранки, од кои  $m_l = 6$  се индуктивни. Бројот на независните јазли е  $n = 5$  и за векторот на напоните на јазлите може да се напише  $\mathbf{U} = [u_1, u_2, u_3, u_4, u_5]^T$ . Во согласност со ова, водејќи сметка за ознаките во колото и усвоените референтни насоки, за индуктивните гранки од ова коло, можеме да пишуваме:

$$\text{Гранка 1-2. } E_{L2}(t) = u_1(t - \Delta t) - u_2(t - \Delta t) + R_{L2} \cdot i_2(t - \Delta t);$$

$$\text{Гранка 1-3. } E_{L3}(t) = u_1(t - \Delta t) - u_3(t - \Delta t) + R_{L3} \cdot i_3(t - \Delta t);$$

$$\text{Гранка 2-4. } E_{L4}(t) = u_2(t - \Delta t) - u_4(t - \Delta t) + R_{L4} \cdot i_4(t - \Delta t);$$

$$\text{Гранка 3-5. } E_{L5}(t) = u_3(t - \Delta t) - u_5(t - \Delta t) + R_{L5} \cdot i_5(t - \Delta t);$$

$$\text{Гранка 2-6. } E_{L6}(t) = u_2(t - \Delta t) - 0 + R_{L6} \cdot i_6(t - \Delta t);$$

$$\text{Гранка 3-7. } E_{L7}(t) = u_3(t - \Delta t) - 0 + R_{L7} \cdot i_7(t - \Delta t).$$

в) Пресметка на струите на еквивалентните струјни генератори

Пред да се пристапи кон определувањето на вредностите на напоните на јазлите ( $U_i; i = 1, n$ ), ќе биде неопходно да се пресметаат елементите на векторот  $\mathbf{J}$ . За таа цел најнапред ќе биде потребно, со помош на познатите правила, секој напонски генератор да се трансформира во соодветен струен генератор.

На сликата 11.8 кон индуктивната гранка  $i, i = 1, m_l$ , е придружен напонски генератор со напон  $E_{Li}$ . При трансформирање на овие напонски генератори во струјни, за определување на струите на струјните генератори се користат следниве релации:

$$j_{gi} = \frac{E_{Li}}{R_{Li}}; \quad i = 1, 3, \dots, m_l;$$

т.е.

$$j_{g2} = \frac{E_{L2}}{R_{L2}}; \quad j_{g3} = \frac{E_{L3}}{R_{L3}}; \quad j_{g4} = \frac{E_{L4}}{R_{L4}}; \quad j_{g5} = \frac{E_{L5}}{R_{L5}}; \quad j_{g6} = \frac{E_{L6}}{R_{L6}}; \quad j_{g7} = \frac{E_{L7}}{R_{L7}}.$$

Откога ќе ги пресметаме струите на струјните генератори во гранките преминуваме на пресметка на струите на еквивалентните струјни генератори на јазлите. Притоа, струјата на еквивалентниот струен генератор на јазелот  $k, j_{gk}$ , се пресметува како алгебарската сума на струите на сите струјни генератори што со едниот крај се врзани за тој јазел. При сумирањето со знак плус се земаат струите на струјните генератори чиешто референтни насоки се ориентирани кон јазелот  $k$  и со знак минус се земаат струите на струјните генератори чиешто референтни насоки се ориентирани од јазелот  $k$ .

За колото прикажано на сликата 11.9, врз основа на топологијата на колото и усвоените референтни насоки, за струите на еквивалентните струјни генератори на јазлите можеме да пишуваме:

$$j_1 = i_g - i_{g2} - i_{g3};$$

$$j_2 = j_{g2} - j_{g4} - j_{g6};$$

$$j_3 = j_{g3} - j_{g5} - j_{g7};$$

$$j_4 = j_{g4};$$

$$j_5 = j_{g5}.$$

Струите на еквивалентните струјни генератори на јазлите се елементи на векторот  $\mathbf{J}$ , т.е.

$$\mathbf{J} = [j_1 \quad j_2 \quad j_3 \quad j_4 \quad j_5]^T.$$

г) Пресметка на напоните во јазлите од колото

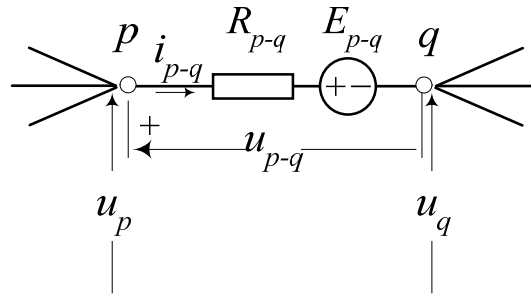
Напоните во јазлите се добиваат со решавање на системот линеарни алгебарски равенки (11.14). За анализираниот временски интервал тоа се прави за секое  $t = k \cdot \Delta t$ ; ( $k=1, 2, \dots$ ). При повеќекратното решавање на системот (11.14) може да се користи фактот дека елементите на матрицата  $\mathbf{G}$  се константни. Притоа, ако решавањето е со помош на инверзија на  $\mathbf{G}$  тогаш е доволно инверзијата да се направи само еднаш, а ако решавањето се прави преку факторизација на  $\mathbf{G}$  на долна и горна триаголна матрица, пак факторизацијата се прави само еднаш. Вториот од наведените начини се препорачува кога бројот на јазлите не е мал.

За секое  $t$  за кое се решава системот (11.14) елементите на векторот  $\mathbf{J}$  се определуваат со постапките опишани со потточките б) и в).

д) Пресметка на струите во гранките од колото

По определувањето на напоните во јазлите се преминува кон пресметка на струите во гранките од колото при што се враќаме во колото од сликата 11.8. Струите во гранките се добиваат врз основа на следниот алгоритам којшто е во согласност со сликата 11.10. Струјата  $i_{p-q}$  во гранката што ги поврзува јазлите  $p$  и  $q$ , со референтна насока од  $p$  кон  $q$ , ќе биде:

$$i_{p-q} = \frac{u_{p-q} - E_{p-q}}{R_{p-q}} = \frac{(u_p - u_q) - E_{p-q}}{R_{p-q}}.$$



Слика 11.10. Кондензатор како елемент од едно електрично коло

Притоа, во општ случај, за гранката  $i$  ( $i = 1, m$ ) ќе биде:

$R_{p-q} = R_i$  и  $E_{p-q} = 0$  ако гранката е отпорник;

$R_{p-q} = Z_{C,i} = 2C_i / \Delta t$  и  $E_{p-q} = E_{C,i}$  ако гранката е кондензатор и

$R_{p-q} = Z_{L,i} = 2L_i / \Delta t$  и  $E_{p-q} = -E_{L,i}$  ако гранката е индуктивен елемент.

**Задача 311.3.** Да се пресметаат временските текови  $i_1(t)$ ,  $i_2(t)$  и  $i_3(t)$  на струите и напоните  $u_1(t)$ ,  $u_2(t)$  и  $u_3(t)$  во колото од сликата 11. 8. Познати се следните податоци:

Заштитно јаже:  $Z_C = 400 \Omega$ ;  $L'_C = 1,333 \mu\text{H/m}$ ;

Столбови:  $L_{S1} = L_{S2} = L_S = 13,2 \mu\text{H}$ ;  $R_{S1} = R_{S2} = R_S = 10 \Omega$ ;

Параметри на громот:  $R_g = 200 \Omega$ ;  $S = 10 \text{ kA}/\mu\text{s}$ ,  $T_c = 5 \mu\text{s}$ ,  $I_m = 50 \text{ kA}$ ;

$$i_g(t) = S \cdot t \text{ за } t \leq T_c \text{ и } i_g(t) = I_m \text{ за } t > T_c;$$

Распони:  $l_{2-3} = l_{2-6} = l_{3-8} = a = 300 \text{ m}$ ;  $x = l_{1-2} = a/4 = 75 \text{ m}$ ;  $l_{1-3} = 3/4 \cdot a = 225 \text{ m}$ .

Процесот да се анализира за вкупно време  $T_{vk} = 10 \mu\text{s}$ , со временски чекор  $\Delta t = 0,1 \mu\text{s}$ . Пред да дојде до атмосферското празнење системот бил без енергија. Пресметките да се направат со помош на програмата “UDAR VO ZJ VO RASPON.xls”. Програмата се активира со едноставно кликување врз сликата од првиот работен лист.

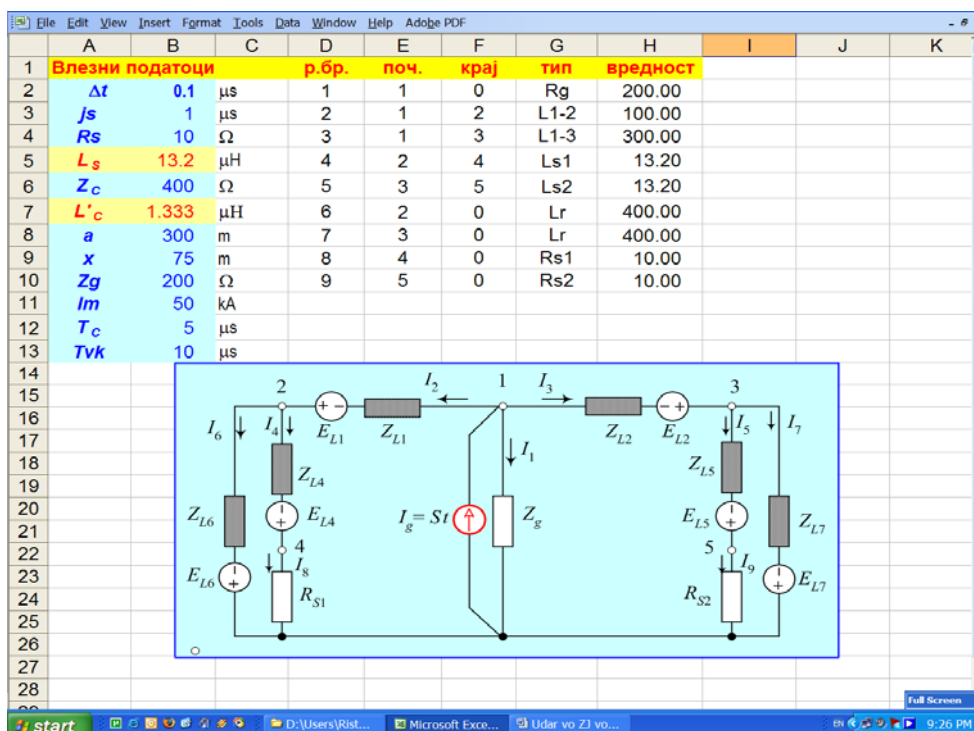


## 11.4. ОПИС НА КОМПЈУТЕРСКАТА ПРОГРАМА “UDAR VO ZJ VO RASPON.XLS”

За решавање на преодниот процес во едно коло со концентрирани параметри на претходно опишаниот начин е изготвена компјутерска програма во VBA под Excel со назив „UDAR VO ZJ VO RASPON.xls“. Програмата е општа и може да се применува за решавање и на кола со други структури. Во нејзината сегашна верзија таа го решава одзивот во колото за струен импулс со линеарно растечко чело и рамен грб.

Работен лист *Vlez*.

Изгледот на првиот работен лист *Vlez* во којшто се внесуваат податоците за анализираното коло е прикажан на сликата 11.11.



Слика 11.11. Изглед на првиот работен лист “Vlez” од програмата

Колото што се анализира се дефинира со податоците сместени во колоните од D до H, во опсегот клетки (D2:H10). Податоците од колоната B, пак, се однесуваат на конкретните вредности на одделните параметри на колото, со коишто се дефинира задачата 3.11.3. Притоа, содржините на одделните клетки од колоната B ги имаат следните значења:

- B2 – временски чекор  $\Delta t$  ( $\mu s$ );
- B3 –  $js$  - место на ударот на громот (индекс на јазелот);
- B4 –  $Rs$  - отпорност на распространување на заземјувачите на столбовите ( $\Omega$ );
- B5 –  $L_s$  - индуктивност на столбовите ( $\mu H$ );
- B6 –  $Z_c$  - бранова импеданција на заштитното јаже ( $\Omega$ );
- B7 –  $L'_c$  - подолжна импеданција на заштитното јаже ( $\mu H/m$ );
- B8 –  $a$  - должина на распонот помеѓу столбовите (m);
- B9 – растојание  $x$  (m) на местото на ударот од левиот столб;
- B10 –  $Z_g$  - бранова импеданција на каналот на громот ( $\Omega$ );
- B11 –  $I_m$  - амплитуда на струјата на громот (kA);
- B12 –  $T_c$  - времетраење на челото на струниот импулс ( $\mu s$ );

$V_{13} - T_{vk}$  - вкупно време за кое се вршат пресметките ( $\mu s$ ).

Податоците за топологијата и структурата на анализираното коло од опсегот келии (D2:H10) ги имаат следните значења.

Колона D. Во неа се внесува редниот број на елементот. Со него се дефинира и индексот на струјата во тој елемент;

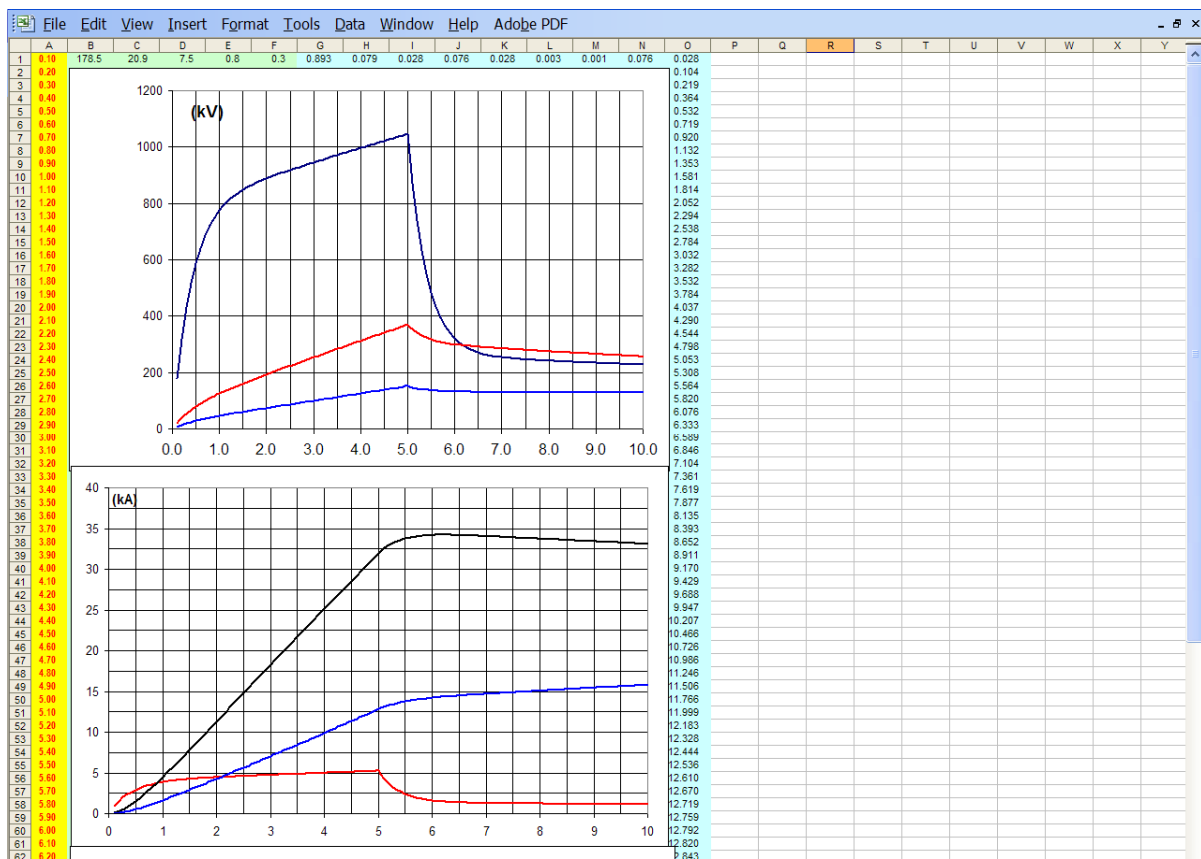
Колона E. Го содржи индексот на почетниот јазел.

Колона F. Го содржи индексот на крајниот јазел. Референтната насоката е секогаш од почетниот кон крајниот јазел од гранката.

Колона G. Го опишува типот на елементот, преку првата буква од називот на неговиот тип. Притоа, ако е таа R тогаш се работи за отпорник. Слично, во случаите кога првата буква е L или C тогаш се работи за индуктивен елемент, односно кондензатор, соодветно.

Колона H. Ги содржи вредностите на отпорностите  $R$ , односно отпорностите  $Z_L$  и  $Z_C$  со коишто се моделираат индуктивните елементи и кондензатори, соодветно. Тие се задаваат директно, или, како во случајов, се пресметуваат со помош на податоците од колоната B, врз база на претходно изложените формули (11.7) и (11.9).

### Работен лист *Rezultati*.



Слика 11.12. Изглед на првиот работен лист “Rezultati” од програмата

Во овој работен лист, покрај нумеричките вредности со коишто се опишани временските текови на сите напони и струи во колото, прикажани се и два дијаграма (слика 11.12). Горниот дијаграм ги прикажува напоните  $u_1$  (црна линија),  $u_2$  (црвена линија) и  $u_3$  (сина линија). Долниот дијаграм, пак, ги прикажува временските текови на струите  $i_1$  (црвена линија),  $i_2$  (црна линија) и  $i_3$  (сина линија).