

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ
ЕЛЕКТРОТЕХНИЧКИ ФАКУЛТЕТ

Младен С. Бањанин

**ЗАШТИТА НАДЗЕМНИХ ВОДОВА ОД
АТМОСФЕРСКИХ ПРЕНАПОНА У
ЕКСТРЕМНИМ УСЛОВИМА**

докторска дисертација

Београд, 2017

UNIVERSITY OF BELGRADE
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING

Mladen S. Banjanin

**LIGHTNING PROTECTION OF
OVERHEAD POWER LINES IN
EXTREME CONDITIONS**

Doctoral Dissertation

Belgrade, 2017

ПОДАЦИ О МЕНТОРУ И ЧЛАНОВИМА КОМИСИЈЕ

Ментор:

Др Златан Стојковић, редовни професор
(Универзитет у Београду - Електротехнички факултет)

Чланови комисије:

Др Златан Стојковић, редовни професор
(Универзитет у Београду - Електротехнички факултет)

Др Јован Микуловић, ванредни професор
(Универзитет у Београду - Електротехнички факултет)

Др Драгутин Саламон, ванредни професор у пензији
(Универзитет у Београду - Електротехнички факултет)

Др Јован Цветић, редовни професор
(Универзитет у Београду - Електротехнички факултет)

Др Зоран Стојановић, доцент
(Универзитет у Београду - Електротехнички факултет)

Датум одбране: _____ .

ЗАШТИТА НАДЗЕМНИХ ВОДОВА ОД АТМОСФЕРСКИХ ПРЕНАПОНА У ЕКСТРЕМНИМ УСЛОВИМА

Резиме

Основни задатак сваког електроенергетског система (ЕЕС) јесте снабдијевање потрошача квалитетном и јефтином електричном енергијом. Да би се овај задатак испунио многи проблеми који се јављају у раду ЕЕС-а морају бити рјешени, а један од израженијих је заштита његових дијелова од атмосферских пренапона.

У овој докторској дисертацији су анализирани могућности примјене различитих система заштите дистрибутивних и преносних надземних водова од атмосферских пренапона који су посљедица директних пражњења у водове. Сви анализирани системи заштите су подијељени у двије групе, стандардни и специјални. У дисертацији је дат њихов детаљан опис, а наведене су им и предности, недостаци и примјери примјене. Од стандардних система заштите анализирани су: избор оптималне трасе надземног вода, уградња заштитних ужади, смањење отпорности уземљења стубова и избор одговарајућег изолационог нивоа надземног вода. Од специјалних система заштите анализирани су: примјена линијских одводника пренапона, уградња додатних заштитних ужади, уградња земљоводних ужади (*underbuilt wires*), примјена затезних ужади (*guy wires*) на стубовима надземног вода и нестандартни системи заштите вода од директних атмосферских пражњења у фазне проводнике. Многи од наведених система заштите су и у свијету ријетко кориштени, а на нашем говорном подручју су дјелимично или потпуно непознати.

Сви нумерички прорачуни чији резултати су приказани у овој дисертацији су урађени кориштењем програмског пакета ЕМТР-АТР. Еквивалентне шеме система су креиране са пажљиво одабраним оптималним моделима елемената. На тај начин се осигурава поузданост и тачност добијених резултата. Оптимални модели елемената су одабрани на бази анализе осјетљивости резултата прорачуна на примјењене моделе. Анализа осјетљивости је урађена тако што су у базној еквивалентној шеми система варирани различити модели једног елемента. На тај начин је одређен парцијални утицај модела елемената на добијене резултате. Поред парцијалног утицаја, анализиран је и кумулативни утицај разлитих група

модела елемената на резултате прорачуна. Показано је да се резултати прорачуна могу високо значајно разликовати ако се систем моделује примјеном различитих комбинација модела елемената.

Могућности примјене стандардних и специјалних система заштите на надземним водовима су одређене примјеном нумеричких симулација. Циљ прорачуна је био да се одреди ефикасност и ограничења различитих система заштите у функцији отпорности уземљења стубова и подносивог напона изолације штићеног вода. Прорачун је рађен за 10 kV и 35 kV дистрибутивне водове, односно за 110 kV и 220 kV преносне водове. Отпорност уземљења стубова је варирана у широком опсегу од 10 Ω до 250 Ω . Показано је да стандардни и специјални системи заштите имају добру ефикасност на водовима са малом отпорношћу уземљења стубова. Са порастом отпорности уземљења стубова ефикасност свих система заштите значајно опада, без обзира на изолациони ниво штићеног вода. Повећањем изолационог напона вода повећава се ефикасност система заштите. У случају водова који су изграђени на тлу велике специфичне електричне отпорности и у области са израженом грмљавинском активношћу заштита од директних атмосферских пражњења се мора пажљиво пројектовати и реализовати како би имала одговарајућу ефикасност. У таквим случајевима најчешће се користе системи заштите базирани на примјени линијских одводника пренапона због њихове ниске цијене реализације и добрих заштитних карактеристика. Најбољи квалитет заштите се постиже уградњом линијских одводника пренапона на сваком стубу и у свакој фази вода. Овако заштићен вод практично не би имао испаде из погона узроковане дјеловањем атмосферских пренапона. Ипак, због оптимизације система заштите са техничко-економског становишта најчешће се врши парцијална уградња линијских одводника пренапона. То значи да се линијски одводници уграђују на неким фазама критичних стубова. У специфичним случајевима се може десити да линијски одводници пренапона не представљају оптимално рјешење. Алтернатива примјени једног или два линијска одводника пренапона по фази вода може бити примјена земљоводног ужета. Овај систем заштите би такође имао добру ефикасност, изузетну поузданост и релативно једноставан начин практичне реализације.

У дисертацији је представљен један нови систем заштите надземних водова од атмосферских пражњења који је назван екстерни систем заштите. Овај систем заштите се базира на идеји да се директно атмосферско пражњење одвоји од штићеног вода. Из тога сlijеди да екстерни систем заштите штити вод од атмосферских пражњења, док сви постојећи системи заштите штите вод од атмосферских пренапона који су последица атмосферских пражњења у вод или у његову околину. Екстерни систем заштите се реализује примјеном екстерних заштитних ужади која се постављају на посебне стубове који се налазе са једне или обје стране штићеног вода. Једно заштитно уже може да обезбједи ефикасну заштиту водовима мале висине и са кратким конзолама. У случају заштите водова са вишим стубовима и са већим димензијама главе стуба морају се користити два ужа и екстерни стубови са обје стране вода.

Екстерни систем заштите до сад није анализиран у научној литератури тако да је комплетна методологија његовог димензионисања нова и оригинална. Начин димензионисања овог система заштите је детаљно разрађен и за дистрибутивне и за преносне надземне водове. Димензионисање заштите је урађено примјеном програмских пакета ЕМТР-АТР и AutoCAD. Неке од прорачунатих димензија су експериментално верификоване у Лабораторији за високи напон која се налази на Електротехничком факултету у Источном Сарајеву. Експеримент је рађен на физички смањеном моделу система.

Највећи недостатак екстерног система заштите је висока цијена његове реализације. Тиме се може објаснити чињеница да он до сад није практично примјењен. Са друге стране, овај систем заштите може да обезбједи изузетно ефикасну заштиту надземног вода уз минималну потребу за одржавањем у дугом временском периоду. Екстерни систем заштите је погодан и за примјену у заштити надземних кабловских водова од директних атмосферских пражњења. У случају када се примјењује за заштиту улазних распона вода у неки објект овај систем заштите штити и вод од испада из погона и опрему у прикључном објекту од атмосферских пренапона. С обзиром да се са стране потрошача и произвођача електричне енергије непрекидно уводе све скупљи и на пренапоне осјетљивији уређаји, поготово у дистрибутивној мрежи, може се очекивати да екстерни систем

заштите у будућности буде практично примјењен. У дисертацији су наведене и предности, недостаци и примјери примјене екстерног система заштите.

Резултати који су приказани у овој докторској дисертацији су практично примјењљиви у процесу пројектовања заштите надземних водова од атмосферских пренапона који су посљедица директних пражњења у водове. На бази приказаних резултата могуће је планирати и пројектовати систем заштите конкретног критичног дистрибутивног или преносног надземног вода.

Кључне ријечи: атмосферски пренапони, надземни водови, модели елемената, системи заштите.

Научна област: Техничке науке – Електротехника

Ужа научна област: Електроенергетски системи

УДК: 621.3

LIGHTNING PROTECTION OF OVERHEAD POWER LINES IN EXTREME CONDITIONS

Abstract

The fundamental task of every electric power system (EPS) is to provide the consumers with a quality and cheap electrical energy. To accomplish this task, many problems occurring in the operation of an EPS must be solved, and one of the significant ones is the protection of its parts against lightning overvoltages.

In this doctoral dissertation there is an analysis of application possibilities of different systems of protection of distribution and transmission overhead lines against lightning overvoltages which are the consequence of a direct lightning strikes into the lines. All the analysed lightning protection systems are divided into two groups, standard and special ones. There is their detailed description in the dissertation, together with the overview of their advantages, disadvantages and examples of application. Among the standard lightning protection systems, there have been analysed: selection of the optimal route for an overhead line, installation of shield wires, decrease of tower grounding resistance and the selection of adequate basis lightning insulation level (BIL) of an overhead line. Among the special lightning protection systems, there have been analysed: application of line arresters, installation of additional shield wires, installation of underbuilt wires, application of guy wires on overhead line towers and nonstandard protection systems against shielding failures. Many of the named protection systems are rarely used even in the world, and in our region they are partially or completely unknown.

All the numerical calculations whose results have been presented in this dissertation were made by using EMTP-ATP software package. Equivalent system circuits have been created with carefully selected optimal models of elements. In that way, the reliability and accuracy of the obtained results have been assured. The optimal models of elements have been selected on the basis of the sensitivity analysis of calculation results to the applied models. The sensitivity analysis has been done in such a way that different models of one element have been varied in the basic equivalent circuit of the system. In that way, the partial influence of models of elements to the obtained results has been determined. Besides the partial influence, the cumulative influence of different

groups of models of elements to the calculation results has been analysed as well. It has been shown that the calculation results may differ very significantly if the system is modelled by the application of different combinations of models of elements.

The possibilities of application of standard and special lightning protection systems on overhead lines have been determined by the application of numerical simulations. The aim of the calculation was to determine the efficiency and limits of different lightning protection systems in the function of tower grounding resistance and the BIL of the protected line. The calculation was made for 10 kV and 35 kV distribution lines, that is for 110 kV and 220 kV transmission lines. Tower grounding resistance was varied in the wide range from 10 Ω to 250 Ω . It has been shown that standard and special lightning protection systems have a good efficiency on overhead lines with a small tower grounding resistance. With the increase of tower grounding resistance, the efficiency of all protection systems significantly decreases, regardless of the protected line BIL. With the increase of a line BIL, the efficiency of protection systems is increased. In the case of overhead lines which are built on a ground with high specific soil resistivity and in the area with an emphasized thunder activity the lightning protection must be carefully designed and realised in order to have an adequate efficiency. In such cases, the lightning protection systems which are used most often are the ones based on the application of line arresters due to their low realization cost and good protective characteristics. The best protection efficiency is achieved by the installation of line arresters on every tower and on every phase of an overhead line. The line protected in this way would practically have no trip outs caused by the lightning overvoltages. However, because of the protection system optimization from the technical-economic standpoint the partial installation of line arresters is performed most often. It means that line arresters are built in on some phases of critical towers. In specific cases, it may happen that line arresters do not present an optimal solution. The alternative to the application of one or two line arresters per phase may be the application of an underbuilt wire. This protection system would also have a good efficiency, extraordinary reliability and a relatively simple way of practical realization.

A new system of overhead lines lightning protection, called external lightning protection system, has been presented in the dissertation. This protection system is based on the idea to separate the direct lightning strikes from the protected line. From

that, it follows that the external lightning protection system protects the line from lightning strikes, while all the existing lightning protection systems protect the line from lightning overvoltages which are the consequence of lightning strikes into the line or into its environment. The external lightning protection system is realised by the application of external shield wires which are placed on special towers which are at one or both sides of the protected line. One shield wire may provide an efficient protection to the lines with small height and with short cross arms. In the case of protecting the lines with higher towers and with larger dimensions of the tower head, two shield wires have to be used, as well as the external towers from both sides of the line.

The external lightning protection system has not been analysed in the scientific literature up to now, so the complete methodology of its dimensioning is new and original. The way of dimensioning of this protection system has been elaborated in detail both for distribution and transmission overhead lines. The dimensioning of the protection has been done by the application of EMTP-ATP and AutoCAD software packages. Some of the calculated dimensions have been verified experimentally in the High Voltage Laboratory at the Faculty of Electrical Engineering in East Sarajevo. The experiment was conducted on a physically scaled model of the system.

The biggest disadvantage of the external lightning protection system is the high price of its realization. That can be the explanation of the fact that it practically has not been applied yet. On the other hand, this protection system may provide an extraordinary efficient lightning protection of an overhead line with the minimal need for maintenance in a long time period. The external lightning protection system is also appropriate to be applied in the protection of overhead cable lines from direct lightning strikes. In the case when it is applied for the protection of input spans of an overhead line into an object, this protection system also protects the line from trip outs as well as the equipment in the object to which the line is connected from lightning overvoltages. Due to the fact that, from the side of electrical energy consumers and producers, the devices which are more and more expensive and which have greater sensitivity to overvoltages are being continuously introduced, especially in a distribution network, it can be expected for the external lightning protection system to be practically applied in the future. The advantages, disadvantages and application examples of the external lightning protection system have all been stated in the dissertation.

The results presented in this doctoral dissertation are practically applicable in the design process of overhead line protection from lightning overvoltages which are the consequence of direct lightning strikes into the line. On the basis of the presented results, it is possible to plan and design a lightning protection system for a real critical distribution or transmission line.

Keywords: lightning overvoltages, overhead electric power lines, models of elements, lightning protection systems

Scientific field: Technical science – Electrical engineering

Specific scientific field: Power systems

UDK: 621.3

Садржај:

1. УВОД	1
2. СТАНДАРДНИ СИСТЕМИ ЗАШТИТЕ НАДЗЕМНИХ ВОДОВА ОД АТМОСФЕРСКИХ ПРЕНАПОНА	6
2.1. Избор оптималне трасе	7
2.2. Уградња заштитних ужади	10
2.3. Смањење отпорности уземљења стубова	15
2.4. Избор одговарајућег изолационог нивоа	18
2.5. Ефикасност и ограничења стандардних система заштите	22
3. СПЕЦИЈАЛНИ СИСТЕМИ ЗАШТИТЕ НАДЗЕМНИХ ВОДОВА ОД АТМОСФЕРСКИХ ПРЕНАПОНА	23
3.1. Линијски одводници пренапона	23
3.2. Земљоводна ужад	36
3.3. Затезна ужад	45
3.4. Заштита вода од директних пражњења у фазне проводнике	47
3.5. Ефикасност и ограничења специјалних система заштите	49
4. МОДЕЛОВАЊЕ НАДЗЕМНОГ ВОДА У ПРОРАЧУНИМА АТМОСФЕРСКИХ ПРЕНАПОНА	50
4.1. Модел атмосферског пражњења	55
4.2. Модел ужади и фазних проводника	60
4.3. Модел стуба	64
4.4. Модел уземљивача стуба	67
4.5. Модел прескока на ваздушној изолацији	70
4.6. Модел одводника пренапона	76
4.7. Кумулативни утицај модела елемената на резултате прорачуна	82
4.8. Оптимални модели елемената	83
5. ЕФИКАСНОСТ СТАНДАРДНИХ И СПЕЦИЈАЛНИХ СИСТЕМА ЗАШТИТЕ НАДЗЕМНИХ ВОДОВА ОД АТМОСФЕРСКИХ ПРЕНАПОНА	86
5.1. Заштита дистрибутивног 10 kV вода	89
5.2. Заштита дистрибутивног 35 kV вода	95
5.3. Заштита преносног 110 kV вода	100
5.4. Заштита преносног 220 kV вода	104
5.5. Дискусија резултата нумеричких прорачуна	109

6. ЕКСТЕРНИ СИСТЕМ ЗАШТИТЕ НАДЗЕМНИХ ВОДОВА.....	113
6.1. Постојећи екстерни системи заштите	113
6.2. Екстерни систем заштите надземних преносних водова.....	115
6.3. Екстерни систем заштите надземних дистрибутивних водова	139
6.4. Дискусија	151
7. ЗАКЉУЧАК.....	155
8. ЛИТЕРАТУРА.....	158
9. ПРИЛОЗИ	177
9.1. Прилог 1 – Спецификација кориштене лабораторијске опреме	177
9.2. Прилог 2 –Уређај за контролисано окидање ударног генератора	181

1. Увод

Основни задатак сваког електроенергетског система (ЕЕС) јесте снабдијевање потрошача квалитетном и јефтином електричном енергијом. Један од најбитнијих критеријума за оцјену квалитета испоручене електричне енергије јесте непрекидност напајања. У већини држава свијета најчешћи узрочник испада водова из погона јесу атмосферска пражњења, односно пропратни атмосферски пренапони. Поред лошег утицаја на квалитет електричне енергије, исподи водова из погона изазивају повећане економске губитке у експлоатацији ЕЕС-а, изазивају појаву пренапона у систему, могу довести до кварова или неправилног функционисања различитих уређаја, а у случају испада важнијих водова може доћи и до нарушавања стабилности ЕЕС-а. Неплански исподи надземних водова из погона стварају проблеме и у индустријским постројењима у којима може доћи до израде производа лошег квалитета или до знатног смањења ефикасности производног процеса. Атмосферски пренапони веома често праве проблеме и на радио-телевизијским предајницима, предајницима мобилне и фиксне телефоније, интернет серверима и везама итд, што доводи до губљења важних података или до прекидања комуникационих веза. Прекиди напајања, који су узроковани атмосферским пренапонима, су честа појава и у многим приморским и планинским туристичким центрима. У циљу повећања квалитета услуга и комфора туриста овакви догађаји се морају свести на најмању могућу мјеру.

Проблеми на надземним водовима који су узроковани атмосферским пренапонима су уочени приликом експлоатације првих водова који су изграђени почетком 20. вијека. У циљу рјешавања уочених проблема дефинисани су основни системи заштите који су углавном и данас у употреби [1]-[8]. Примјена заштитних ужади на надземним водовима у циљу заштите од директних атмосферских пражњења у фазне проводнике је анализирана давне 1903. године [1]. Као алтернативно рјешење 1907. године се предлаже примјена штапних хваталки [2]. У истом раду се анализира и могућност кориштења подземних каблова као додатних уземљивача за побољшање перформанси критичних водова [2]. Заштита изолаторских ланаца од електричног лука и грмљавине је анализирана 1910. године [3]. Примјена одводника пренапона за заштиту елемената ЕЕС-а од атмосферских пренапона је предложена 1894. године [4]. Неке од првих

публикација у којима се анализира могућност примјене линијских одводника пренапона се појављују 1905. године [5],[6]. Исте године је публикован и рад [7] у коме су сумирана експлоатациона искуства са различитим системима заштите надземних водова од атмосферских пренапона. Један од првих радова у коме се може наћи детаљан опис конструкције тадашњих линијских одводника пренапона потиче из 1930. године [8]. Анализом наведених публикација може се закључити да је већина система заштите који се данас користе давно описана. Неки од тих система су константно кориштени од времена изградње првих надземних водова до данашњег дана (нпр. заштитна ужад), док су неки системи заштите уведени у масовнију употребу тек у задњих 20-25 година (нпр. линијски одводници пренапона).

Упркос вишедеценијском раду на рјешавању проблема на надземним водовима који су узроковани атмосферским пренапонима исти су и данас најчешћи узрочник испада водова из погона у многим државама. Подаци за поједине државе су дати у табели 1.1.

Табела 1.1 - Процент испада надземних водова из погона узрокованих атмосферским пренапонима за поједине државе

Држава	Број испада	Држава	Број испада
САД	57% [9]	Колумбија	47-69% [9]
Бразил	50-70% [9]	Данска	57% [9]
Јужна Кореја	66% [10]	Јапан	70-80% [9], >50% [11]
Кина	40-70% [12]	Свазиленд	40% [13]

Најчешћи узрочник испада из погона преносних надземних водова називног напона од 132 kV до 765 kV који се налазе у Јужноафричкој републици су птице (38% испада), а након њих атмосферски пренапони (26% испада) [14]. Средњи годишњи број испада из погона 130 kV надземних водова у Шведској је био 2,53 испада/год/100 km, од чега је 3% трајних испада, а 97% су привремени испади. Атмосферски пренапони су узроковали 70% укупног броја испада, тј. 1,8 испада/год/100 km, [15]. Велики број кварова на надземним водовима у Мексику су такође узроковани атмосферским пренапонима [16]. Подаци за 2005. и 2006. годину показују да је 42% и 49% кварова на 230 kV водовима респективно

било узроковано атмосферским пренапонима, док је на 400 kV водовима тај број износио 28% и 47% кварова респективно [16]. У 2010. години у ЕЕС-у Француске је 62% испада преносних надземних водова из погона било узроковано различитим атмосферским утицајима [17]. Од тог броја атмосферска пражњења су чинила 76% испада, односно 47% од укупног броја испада.

У чланку [18] је описано 13 највећих кварова у историји ЕЕС-а САД-а, а два од тих испада су узроковани атмосферским пренапонима. У једном од та два случаја је 9 милиона људи 26 часова остало без напајања електричном енергијом. Атмосферски пренапони су 11. марта 1999. године довели до потпуног распада ЕЕС-а Бразила на више изолованих система [19]. Том приликом је између 75 и 97 милиона од 160 милиона становника Бразила остало без напајања електричном енергијом. Узрок распаду система је било атмосферско пражњење које је избацило из погона једно 400 kV постројење. Након тога је дошло до каскадних испада из погона других водова што је резултирало испадом хидроелектране Итаипу (14 GW инсталисане снаге) која је у то вријеме била највећа хидроелектрана на свијету.

У независном оператору система БиХ (НОС БиХ) је регистровано неколико случајева када су атмосферски пренапони изазвали испад из погона вода који је у том тренутку једнострано напајао мјесто од више хиљада или десетина хиљада становника. Овакви случајеви су регистровани у периодима када се раде ремонти постројења и водова услед чега се комплетно напајање мјеста врши преко једног преносног вода. У дистрибутивним мрежама атмосферска пражњења често изазивају трајне кварове и дуготрајне испаде водова из погона услед оштећења дрвених стубова, прегорјевања струјних мостова, оштећења и пуцања фазних проводника, оштећења изолатора итд.

Данас се за отклањање пролазних кварова на надземним водовима најчешће користи систем искључења са аутоматским поновним укључењем (АПУ). Идеја је да се вод, на коме се појави квар, краткотрајно искључи и да се након тога поново укључи. На преносним водовима се користи једноциклични или евентуално двоциклични АПУ. На дистрибутивним водовима се користи и вишециклични АПУ који се реализује примјеном уређаја реклозера. Овај начин отклањања кварова је широко примјењен и у многим случајевима потпуно довољан за

обезбјеђивање минималног броја трајних испада водова из погона. Ипак, примјена АПУ-а има неколико ограничења. На преносним водовима операција АПУ-а може да изазове високе склопне пренапоне или проблеме са стабилношћу ЕЕС-а, нпр. испади 400 kV или 500 kV водова из погона усљед директних пражњења у фазне проводнике. Поједине електране су са остатком ЕЕС-а повезане преко само једног преносног надземног вода (нпр. ХЕ Вишеград, ТЕ Станари итд) тако да испад повезног вода изазива испад комплетне електране. При томе се у електрани јављају велика механичка и електрична напрезања која могу да изазову озбиљна оштећења опреме. Операција АПУ-а представља велико оптерећење и за високонапонске прекидаче, поготово ако је АПУ безуспјешан када прекидачи минимум два пута у кратком временском периоду искључују струју кратког споја. Честе АПУ операције знатно смањују период између два ремонта прекидача, као и животни вијек прекидача, који је после генератора и трансформатора један од најскупљих електричних уређаја у постројењу.

Ефикасност операције АПУ се може сагледати на примјеру три 110 kV вода која се налазе на приморју Хрватске: Дуги рат-Нережишћа 1, Дуги рат-Нережишћа 2 и Нережишћа-Стари град [20]. У периоду 2009-2013. година регистрован је 71 испад ових водова из погона. Корелацијом података о реаговању релејне заштите и података о грмљавинској активности утврђено је да је 46 испада, или око 65%, сигурно узроковано атмосферским пренапонима, а сматра се да тачан број износи 59 испада. При томе је 13 од 46 испада, или око 28%, било трајног карактера, док су остали кварови отклоњени помоћу АПУ-а. Дакле, ефикасност АПУ-а за испаде водова који су сигурно узроковани дјеловањем атмосферских пренапона је била око 72%.

У [21] је приказана детаљна анализа искустава Електромреже Србије (ЕМС) са прескоцима на преносним водовима у периоду 2000-2013. година. Укупан број испада из погона преносних надземних водова (110, 220 и 400 kV) у посматраном периоду је био 15396, од чега је 1956, или 12,7%, изазвано грмљавином. Број успјешних АПУ операција је износио 1155 од укупно 1956 операција, или 59%. Процентуалана успјешност операције АПУ-а, према подацима републичких диспечерских центара Србије, је била 57% за 110 kV систем, 64% за 220 kV систем и 80% за 400 kV систем. Успјешност операције АПУ-а за једнофазне

кварове је износила 65%, за двофазне кварове 53%, а за трофазне кварове 40%, што је неочекивано ниска ефикасност. Неколико узрока овој појави је наведено у [21]. Да би операција АПУ-а била успјешна искључење вода са обје стране мора бити синхронизовано што значи да мора постојати квалитетна и непрекидна комуникација између релеја на два краја вода. Затим, операција АПУ-а се аутоматски блокира у случају када заштитни релеј од прекидача не добије информацију о његовој спремности да изврши комплетан циклус укључење-искључење вода. Такође, АПУ операција се аутоматски блокира и у случају када заштита региструје несиметрију полова прекидача.

Систем АПУ је креиран да штити водове од трајних испада из погона. Ипак, модерни потрошачи и произвођачи електричне енергије све мање толеришу и привремене прекиде напајања. Како би се број привремених и трајних испада надземних водова из погона који су узроковани атмосферских пренапонима максимално смањио развијен је и усавршен велики број различитих система заштите. Према стандарду IEEE 1243-1997 [22] (IEEE – The Institute of Electrical and Electronics Engineers) сви системи заштите се могу подијелити у двије групе, стандардни и специјални. Стандардни системи заштите представљају основне системе заштите који се примјењују на свим водовима који се желе штитити од атмосферских пренапона. Специјални системи заштите се користе у посебним случајевима када стандардни системи заштите не могу да обезбједе потребне заштитне карактеристике критичном воду.

Годишњи број испада надземног вода из погона, који су узроковани атмосферским пренапонима, првенствено зависи од сљедећа три фактора:

1. Метеоролошки параметри, који се представљају преко керауничког нивоа посматране области, односно преко густине атмосферских пражњења по јединици површине тла.
2. Карактеристике терена, које се представљају преко специфичне електричне отпорности тла, односно отпорности уземљења стубова надземног вода.
3. Карактеристике надземног вода, од којих су најбитније подносиви напон његове изолације и присуство заштитног ужета, а затим и присуство других стандардних и специјалних система заштите.

2. Стандардни системи заштите надземних водова од атмосферских пренапона

Приликом реализације заштите надземних водова од атмосферских пренапона циљ је да се остваре максималне техничке перформансе штићеног вода уз минимална улагања материјалних средстава. Због тога сви стандардни и специјални системи заштите које су данас у употреби полазе од чињенице да је директно пражњење у надземни вод неминовно, а заштитним мјерама се жели спријечити појава квара на воду. Стандардни системи заштите се требају примјењивати у фазама планирања и трасирања вода, као и у фази изградње вода, како би се постигла њихова максимална ефикасност.

Приликом пројектовања трасе надземног вода треба да се примјењују високорезолуцијске мапе грмљавинских активности за дато подручје или керауничке мапе ако прве наведене нису на располагању. Циљ је да се одреди оптимална траса вода, тј. да се вод гради кроз области са малом грмљавинском активношћу како би се укупан број пражњења у вод и у његову околину свео на најмању могућу мјеру. У току изградње надземног вода треба да се примјене одговарајући системи заштите од атмосферских пренапона (уградња заштитног ужета, избор оптималног подносивог напона изолације и реализација квалитетног уземљивача стубова) како би се вјероватноћа појаве квара приликом дјеловања атмосферских пренапона свела на најмању могућу мјеру.

Суштински посматрано громобранска заштита надземних водова се базира на истом принципу као и громобранска заштита других објеката. Њу чине три међусобно повезане компоненте:

1. Прихватни систем (заштитно уже), у који се одвија атмосферско пражњење.
2. Спусни проводници (стубови вода), који имају улогу да одведу струју пражњења са прихватног система на уземљивач.
3. Уземљивачи (темељни уземљивачи стубова), који имају улогу да струју пражњења одведу у тло и на тај начин спријече појаву испада вода из погона.

Имајући у виду претходно речено може се закључити да у стандардне системе заштитне надземних вода од атмосферских пренапона спадају:

- 1) Избор оптималне трасе.
- 2) Уградња заштитних ужади.
- 3) Смањење отпорности уземљења стубова.
- 4) Избор одговарајућег изолационог нивоа.

2.1. Избор оптималне трасе

Један од првих корака у процесу пројектовања надземног вода је избор његове оптималне трасе, а основни критеријум оптимизације најчешће је цијена. Посматрано са економског аспекта веома је важно да дужина надземног вода буде што је могуће краћа јер се на тај начин знатно смањују високи трошкови изградње вода, али и губици приликом његове експлоатације. Ипак, многи други фактори такође имају важан утицај на избор оптималне трасе. Конфигурација ЕЕС-а и потребе потрошачког конзума диктирају гдје ће бити изграђен надземни вод, односно гдје ће почињати и гдје ће се завршавати. Веома често избор трасе вода је одређен условима заштите природних љепота, националних паркова, споменика културе и других области од посебног значаја. У циљу смањења инвестиционих трошкова изградње вода настоје се избјећи неприступачни предјели као што су планински врхови, мочваре, језера и слично. Избјегавајући планинске врхове и врхове брда пројектанти надземног вода, често несвјесно, побољшавају његове перформансе са становишта угрожености од атмосферских пренапона.

Поред свих наведених фактора пројектанти трасе надземног вода би морали да воде рачуна и о томе да будући вод треба да пролази кроз предјеле са што је могуће мањом грмљавинском активношћу, али и преко тла са што је могуће мањом специфичном електричном отпорношћу. Први фактор је битан због тога што је потребно обезбједити да се у вод, или његову околину, одвија што је могуће мањи број атмосферских пражњења јер је то најбољи начин његове заштите. Други фактор је битан јер од њега зависи отпорност уземљења стубова вода која има велики утицај на вјероватноћу појаве испада вода из погона приликом дјеловања атмосферских пренапона.

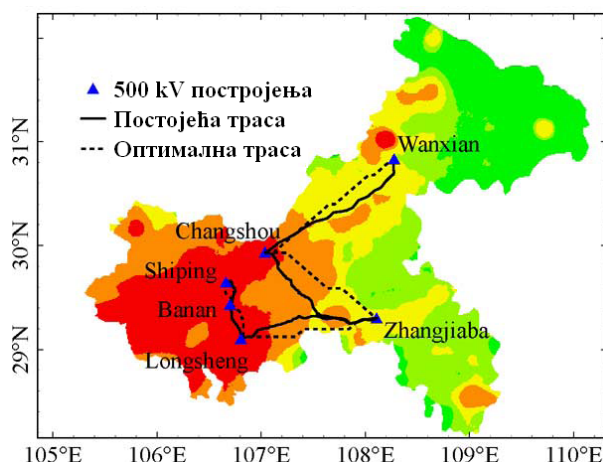
Присуство околних објеката, као што је високо дрвеће [23], може имати позитиван утицај на перформансе вода са становишта заштите од атмосферских

пренапона. Високи околни објекти врше дјелимичну екранизацију вода и тиме знатно смањују број атмосферских пражњења у вод, па самим тим смањују и број испада вода из погона.

Опште прихваћен и више деценија кориштен метод за описивање грмљавинске активности у некој области се базира на примјени керауничког нивоа и керауничких мапа [24]. Кераунички ниво се дефинише као просјечан број грмљавинских дана у току једне године на одређеном подручју. Грмљавински дан је дан када се у посматраној области може чути бар једно атмосферско пражњење. Проблем који се јавља приликом примјене керауничког нивоа је што се он одређује осматрањем, а као метеоролошки параметар се придружује релативно великој области. Овим се занемарују тачке локалног појачања интензитета грмљавине као што су планински врхови. Да би се ријешио овај проблем и да би се одредила тачна грмљавинска активност на малим дијеловима једне велике површине користе се системи за детекцију грмљавинских активности који су базирани на примјени сензорске мреже постављене у посматраној области [25]. Типично се користе три врсте сензора и то сензор електричног поља, сензор магнетног поља и акустични сензор. Рјеђе се користи и оптички сензор. Примјеном ових сензора могуће је релативно тачно одредити параметре и позицију атмосферског пражњења (поларитет, амплитуда струје, узастопност пражњења, локација пражњења итд). Високорезолуцијске мапе густине грмљавинских пражњења на подручју Европе се могу наћи у [26]. Потребно је нагласити да постоје и специјални системи за детекцију грмљавинских активности који се базирају на примјени сензора постављених у свемиру [27]. На простору бивших југословенских република постоје два система за детекцију грмљавинских активности, систем SCALAR [28] (Slovenian Centre for Automatic Localization of Atmospheric Discharges) и LINET [29]. Примјери високорезолуцијских мапа грмљавинских активности за Босну и Херцеговину (SCALAR) и Србију (LINET) се могу наћи у [30] и [31] респективно.

Примјеном високорезолуцијских мапа грмљавинских активности могуће је вршити избор оптималне трасе надземног вода, што се показује као веома битно у случају градње важних водова у областима са израженом грмљавинском активношћу. Примјер одређивања оптималне трасе пет 500 kV надземних водова

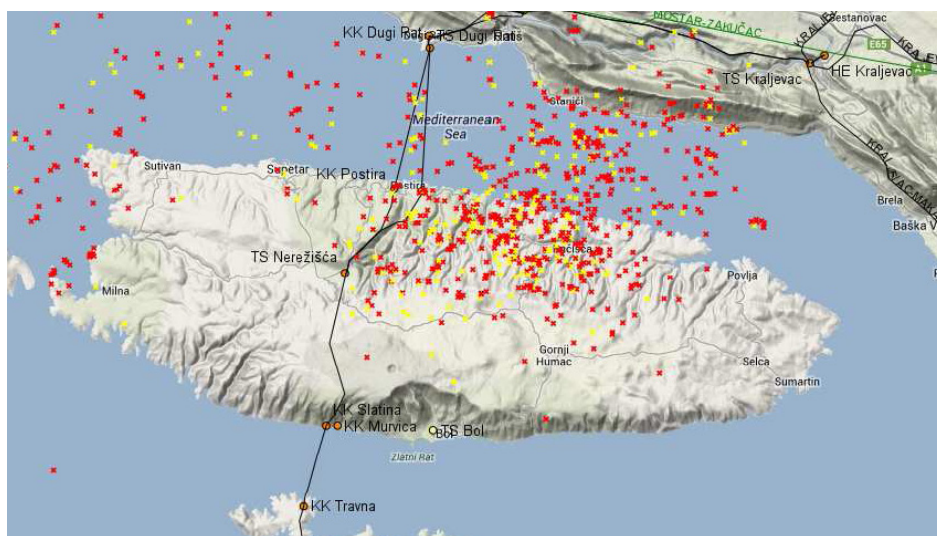
у Кини, у области Chongqing, примјеном високорезолуцијских мапа грмљавинских активности се може наћи у [32]. На слици 2.1 су приказане постојеће и оптималне трасе анализираних водова [32]. Показује се да би надземни водови у случају градње по оптималној траси имали 22,9%, 11%, 9,3%, 14,5% и 49% мањи број испада из погона узрокованих атмосферским пражњењима у односу на постојеће водове. Такође, оптималне трасе надземних водова су краће него постојеће трасе и то редом за 16,3%, 6,2%, 3,6%, 0,9% и 48,7%. Наравно, приликом градње надземних водова многи додатни важни фактори се морају узети у обзир тако да се коначна траса вода добија истовременим уважавањем више различитих оптимизационих критеријума.



Слика 2.1 - Постојеће и оптималне трасе надземних 500 kV водова које су одређене примјеном високорезолуцијских мапа грмљавинских активности [32]

Системи за детекцију грмљавинских активности се успјешно користе и у нашем окружењу, али још увијек првенствено за детекцију критичних стубова на угроженим водовима. У Хрватској постоји неколико 110 kV надземних водова који су веома угрожени од атмосферских пренапона. Као примјер се могу узети три вода која су помињана и у уводном поглављу: Дуги рат-Нережишћа 1, Дуги рат-Нережишћа 2 и Нережишћа-Стари град [20]. Прва два вода повезују острво Брач са копном, а трећи вод повезује острво Брач и острво Хвар. У периоду 2009-2013. година регистрован је 71 испад ових водова из погона, а 59 или 83% њих су повезани са атмосферским пражњењима у љетњим мјесецима. Корелацијом података о реаговању релејне заштите и података о грмљавинској активности који су добијени примјеном система LINET [29] утврђено је да је 46 од 59 испада сигурно узроковано атмосферским пренапонима. Једночасовна грмљавинска

активност у околини острва Брач за датум 5. септембар 2011. године у 11h је приказана на слици 2.2 [20]. Црвени квадратићи на слици 2.2 означавају пражњења између облака и тла (cloud to ground), док жути квадратићи означавају пражњења између два облака (cloud to cloud). На мапи је уцртана и траса критичних 110 kV водова. У овом случају мапе грмљавинских активности су кориштене за детекцију критичних стубова на ова три угрожена вода. Детектовани критични стубови водова су заштићени примјеном линијских одводника пренапона.



Слика 2.2 – Једночасовна грмљавинска активност у околини острва Брач, Хрватска, за дан 5. септембар 2011. године у 11h [20]

2.2. Уградња заштитних ужади

Заштитна или громобранска ужад представљају један од најстаријих и најраспрострањенијих заштитних уређаја надземних водова од атмосферских пренапона. Примјена заштитних ужади на надземним водовима је анализирана давне 1903. године [1]. У циљу елиминисања појаве атмосферских пражњења у фазне проводнике надземног вода одлучено је да се постави нека врста громобранске хватаљке која ће на себе да прихвати пражњење. Због геометрије надземног вода то није могла бити штапна хватаљка па се искористило уже. Оно је постављено на врх стуба надземног вода и изнад његових фазних проводника. Спусни проводници су били стубови надземног вода и преко њих се струја пражњења одводила у тло. Ова врста заштите се задржала до данашњег дана и представља основни систем заштите надземног вода од атмосферских пражњења.

Дуго година је основна и једина функција заштитног ужета на надземном воду била заштита од атмосферских пренапона. Данас је тој основној функцији придодата и функција преноса података за шта се користе оптичка заштитна ужад (OPGW-optical ground wire).

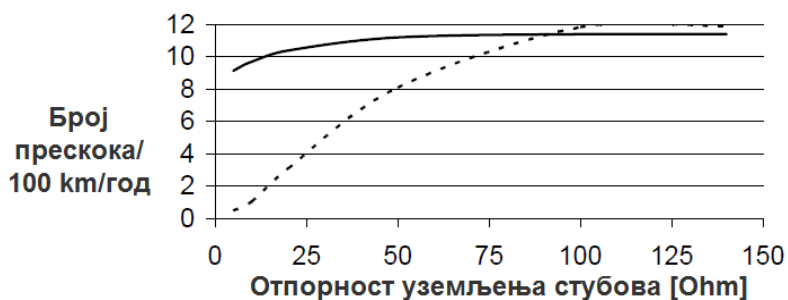
Функција заштитних ужади у смањењу угрожености штићеног вода од атмосферских пренапона се може објаснити кроз следећа три позитивна ефекта њихове уградње [22]:

- 1) Прихватање атмосферских пражњења која би се у супротном десила у фазне проводнике вода.
- 2) Одвођење дијела струје атмосферског пражњења у случају пражњења у стуб вода. У супротном би сва струја протекла кроз стуб и уземљивач вода што би значајно повећало вјероватноћу појаве испада вода из погона.
- 3) Екранизација фазних проводника од индукованих атмосферских напона. Због близине заштитног ужета фазним проводницима значајна је њихова електромагнетна спрега и она доводи до смањења индукованих напона на фазним проводницима.

У случају када надземни вод није снадбјевен заштитним ужетом око 99% свих директних атмосферских пражњења проузрокује испад вода из погона без обзира на изолациони ниво, међуфазно растојање или квалитет уземљења стубова [33]. Према незваничним подацима који су прикупљени примјеном система SCALAR у преносној мрежи Словеније је у вишегодишњем периоду детектовано свега неколико испада 400 kV надземних водова из погона узрокованих атмосферским пренапонима. Сваки од тих испада је био узрокован директним пражњењем у фазни проводник вода (shielding failure). Један од испада се десио при струји пражњења од само 5 kA.

Ипак, у специфичним случајевима примјена заштитних ужади може постати економски неоправдана због слабе ефикасности и високих инвестиционих трошкова уградње. Овај проблем се дешава код водова са ниским називним напоном (нпр. 10 kV водови), или код водова виших називних напона који имају веома велику отпорност уземљења стубова. Због тога се дистрибутивни водови, изузев неких 35 kV водова, граде без заштитних ужади.

На слици 2.3 је приказан утицај отпорности уземљења стубова на годишњи број испада 90 kV вода из погона у случају када је он снабђевен заштитним ужетом (испрекидана линија) и када није снабђевен заштитним ужетом (пуна линија) [34],[35]. У случају велике отпорности уземљења стубова ($\geq 90 \Omega$) заштитно уже на анализираном 90 kV воду је довело до повећања броја испада вода из погона узрокованих атмосферским пренапонима. Разлог томе је што се са уградњом заштитног ужета повећава ефективна висина и атрактивна површина надземног вода па самим тим расте и укупан годишњи број пражњења у вод. Са друге стране, на водовима са релативно ниским подносивим напоном изолације и са великом отпорношћу уземљења стубова практично свако пражњење у вод узрокује испад из погона. Због тога заштитно уже на надземном воду може да има супротан ефекат од очекиваног. У случају малих вриједности отпорности уземљења стубова које се у пракси најчешће срећу (већина електропривреда прописује максималне вриједности испод 10 Ω или 15 Ω) заштитно уже на преносном воду има веома изражен утицај на смањење годишњег броја испада вода из погона узрокованих атмосферским пренапонима, слика 2.3 [34],[35].



Слика 2.3 - Утицај отпорности уземљења стубова на годишњи број испада 90 kV вода са заштитним ужетом (испрекидана линија) и без њега (пуна линија) [34]

На преносним водовима у Србији и БиХ једно заштитно уже се користи на водовима са вертикалним распоредом проводника, док се два заштитна ужета користе на водовима са хоризонталним распоредом проводника.

На слици 2.4 су приказана два сценарија која се могу десити приликом појаве атмосферског пражњења у заштитно уже. На слици 2.4 а) је приказан случај када пражњење у заштитно уже не изазива повратни прескок на штићеном воду [36], док је на слици 2.4 б) приказан случај када пражњење изазива појаву трополног квара на једном систему вода и појаву једнополног квара на другом систему

двосистемског вода [37]. Трећи сценарио је да скоковити лидер прође мимо заштитног ужета и погоди фазни проводник. Вјероватноћа појаве овог сценарија мора да се сведе на најмању могућу мјеру како би заштитна ужад ефикасно обављала своју примарну улогу. Ефикасност екранизације фазних проводника помоћу заштитног ужета директно зависи од геометрије главе стуба, тј. од положаја заштитног ужета у односу на фазне проводнике. Ова проблематика је веома детаљно дискутована у научној литератури [22],[33],[38]-[57].



а)

б)

Слика 2.4 - Атмосферско пражњење у заштитно уже надземног вода а) без повратног прескока [36] и б) са повратним прескоком [37]

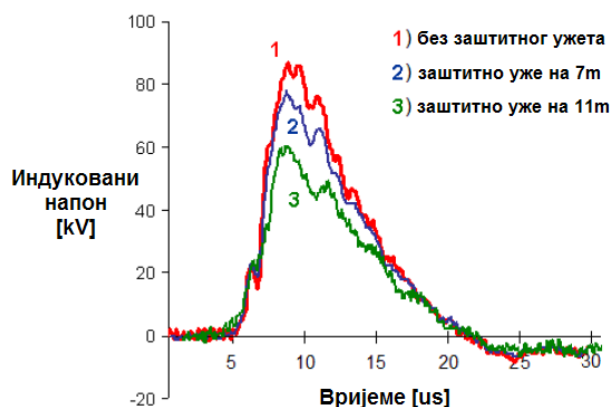
За одређивање оптималног распореда заштитних ужади и фазних проводника на надземном воду често се користи метод заштитног угла [22],[33],[41],[42]. Заштитни угао је угао између праве која пролази вертикално кроз заштитно уже и праве која пролази кроз заштитно уже и спољашњи фазни проводник. Мања вриједност заштитног угла осигурава боље заштите карактеристике вода. У [42] је показано да је за потпуно елиминисање могућности продора скоковитог лидера поред заштитног ужета до фазног проводника потребно да надземни вод има негативан заштитни угао, у конкретном примјеру од $-6,24^{\circ}$.

Дуги низ година се сматрало да заштитни угао треба да буде једнак или мањи од 30° како би фазни проводници били адекватно заштићени од директних атмосферских пражњења [47]. Након интензивних теоретских и лабораторијских истраживања установљено је да се заштитни угао од 30° мора смањити ако се висина надземног вода повећа. Стандард IEC 62305-3 [48] дефинише максималне вриједности заштитног угла у зависности од висине објекта и у зависности од

нивоа заштите објекта. Вриједност заштитног угла опада са повећањем важности објекта и са порастом висине штићеног објекта.

За пројектовање громобранских заштита произвољних објеката користи се метода котрљајуће сфере [48] која се базира на електрогеометријском моделу [44]. При томе се метода котрљајуће сфере користи за заштиту стамбених и других објеката, док се у случају громобранске заштите надземних водова најчешће користи електрогеометријски модел. Детаљне анализе електрогеометријског модела се могу наћи у великом броју научних радова и међународних техничких докумената [22],[33],[38]-[40],[44]-[46],[50]-[57].

Атмосферски пренапони на надземном воду могу бити посљедица директних или индиректних атмосферских пражњења. Индиректна пражњења се одвијају у тло у околини надземног вода и она доводе до појаве индукованих напона на фазним проводницима. Детаљна анализа ове појаве, као и преглед литературе из области утицаја индукованих напона на дистрибутивне водове, је приказана у [58]. Заштитно уже смањује висину индукованих напона на фазним проводницима вода [58]-[62]. Овај ефекат се јавља због електромагнетне спреге између фазних проводника и заштитног ужета. На слици 2.5 [58] је приказан утицај присуства и висине заштитног ужета на висину индукованих напона на фазним проводницима.



Слика 2.5 – Утицај присуства и висине заштитног ужета на висину индукованих напона на фазним проводницима надземног вода [58]

Позитиван ефекат уградње заштитних ужеди на дистрибутивне и преносне водове се може уочити и приликом примјене линијских одводника пренапона. У

том случају заштитна ужад знатно смањују њихово енергетско напрезање. Ова проблематика је дискутована у поглављу 3.1.2.

2.3. Смањење отпорности уземљења стубова

Уземљивачи стубова имају пресудну улогу у ефикасном одвођењу струје атмосферског пражњења у тло. Идеалан уземљивач би требао да има отпорност уземљења једнаку нули. Такав уземљивач би максимално ефикасно одводио струју пражњења у тло, а негативни рефлектовани напонски таласи би редуковали напон конзоле на изузетно ниску вриједност тако да би надземни вод био потпуно заштићен од атмосферских пренапона. Пошто ниједан уземљивач није идеалан у пракси је циљ да се отпорност уземљења стубова сведе на најмању вриједност која је оправдана са економског аспекта.

Када се говори о уземљивачима стубова надземног вода веома је битно направити разлику између отпорности распростирања уземљивача (стационарна отпорност уземљивача или краће отпорност уземљења) и импулсне импедансе уземљења (ударне импедансе уземљивача). Детаљна дискусија ове проблематике се може наћи у [63]. У овој дисертацији се користи термин отпорност уземљења уземљивача стуба умјесто термина импулсна импеданса уземљивача стуба, који више одговара тематици рада. Основни разлози за овакав приступ су:

1. Термин отпорност уземљења уземљивача стуба се усталио и у инжењерској и у научној пракси, те се често користи у анализама атмосферских пренапона на надземним водовима.
2. Након изградње надземног вода, али и у току његове експлоатације, врши се мјерење отпорности уземљења његових стубова. С тога је вриједност отпорности уземљења стубова мање или више познат параметар, док је вриједност импулсне импедансе уземљења стубова непозната.
3. Отпорност уземљења стубова може једноставно да се мјери и да се рачуна примјеном једноставних емпиријских формула.
4. Ефективна вриједност импулсне импедансе уземљивача стуба је практично увијек мања од отпорности уземљења стуба. Због тога резултати прорачуна који се базирају на примјени отпорности уземљења стубова имају нешто критичније вриједности па је њихова примјена оправдана.

Вриједност импулсне импедансе уземљивача није константа за вријеме трајања пренапонског таласа. У анализама се импулсна импеданса најчешће дефинише као однос максималне вриједности напона и максималне вриједности струје у тачки ињектирања струје [63] или као максимална вриједност количника напона и струје у тачки ињектирања струје [64]. Овако дефинисана импулсна импеданса може да се мијења линеарно или нелинеарно са промјеном струје која се одводи са уземљивача [65]-[68]. У случају краћих електрода и већих струја одвођења јачина електричног поља на површини електроде може достићи критичну вриједност при којој долази до појаве јонизације тла. Вриједност критичног електричног поља тла варира у опсегу од 200 kV/m до 1700 kV/m, зависно од отпорности и влажности тла [65]. Јонизовано тло се понаша као проводник па услед тога долази до смањења вриједности импулсне импедансе уземљивача и до интензивнијег одвођења струје атмосферског пражњења у тло. Према [66] јонизација тла око уземљивача стуба надземног вода може да смањи пренапоне на 400 kV надземном воду и до 25%.

За инжењерску анализу импулсних карактеристика уземљивача често је најбитнији параметар компаративна анализа односа ефективне вриједности импулсне импедансе и отпорности распростирања уземљивача [68]. Овај однос је дефинисан преко ударног коефицијента уземљивача стуба. Детаљна анализа ове проблематике се може наћи у [68]. Вриједност ударног коефицијента уземљивача зависи од много фактора, као што су специфична електрична отпорност тла, конфигурација уземљивача, амплитуда и таласни облик струјног импулса и слично [69]. Према [68] вриједности импулсног коефицијента различитих уземљивача су увијек мање од један, осим у случају када су димензије уземљивача веће од његових ефективних димензија.

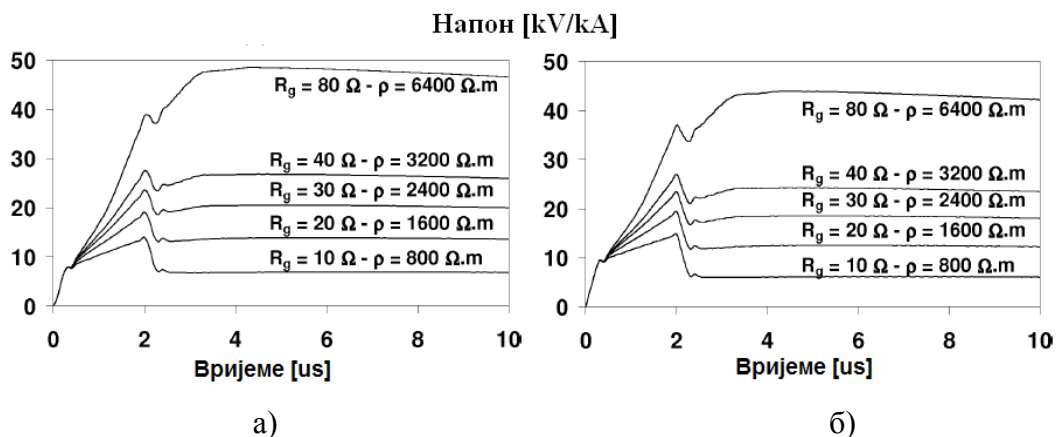
Ефективна дужина уземљивача представља граничну дужину до које се са повећањем димензија уземљивача смањује његова импулсна импеданса [70]. Повећавањем димензија уземљивача изнад ефективних не долази до даљег смањења његове импулсне импедансе зато што се занемарљиво мала струја пражњења одводи у тло са тих удаљених дијелова уземљивача. Ефективна дужина уземљивача се разматра првенствено приликом анализе импулсних карактеристика уземљивача. Оријентационе вриједности ефективних дужина

уземљивача добијене примјеном таласа облика 1,2/50 $\mu\text{s}/\mu\text{s}$ су приказане у табели 2.1 [71]. За мање стрме таласе (нпр. 3/70 μs) вриједности су нешто веће.

Табела 2.1 – Зависност ефективне дужине уземљивача од специфичне електричне отпорности тла за ударни напонски талас облика 1,2/50 $\mu\text{s}/\mu\text{s}$ [71]

Специфична електрична отпорност [Ωm]	100	500	1000	2000	5000
Ефективна дужина уземљивача [m]	10	23	34	50	85

Отпорност уземљења стубова надземног вода има велики утицај на максималне пренапоне на воду који се јављају приликом појаве атмосферских пражњења [72]-[74], па самим тим и на очекивани годишњи број испада вода из погона [75]. На слици 2.6 су приказани таласни облици напона на изолаторским ланцима једносистемског надземног вода са вертикалним распоредом проводника [72]. Напон на слици 2.6 је изражен у прилагођеној јединици [kV/kA]. Пренапон за различите вриједности струја пражњења се може добити множењем вриједности са слике 2.6 са произвољном амплитудом струје пражњења [72]. Приликом смањења отпорности уземљења стубова са 80 Ω на 10 Ω максимални пренапони на воду су се смањили са преко 40 kV/kA до око 14 kV/kA , тј. максимални пренапони су смањени приближно за 70%.



Слика 2.6 – Таласни облици напона на а) најнижем и б) највишем изолаторском ланцу за различите вриједности отпорности уземљења стубова [72]

У случају када је отпорност уземљења стубова велика тешко је пројектовати квалитетну громобранску заштиту вода и неопходно је смањивати њену вриједност. Повећавање димензија уземљивача или постављање вертикалних уземљивачких сонди може ријешити проблем само ако ти уземљивачи

успостављају контакт са боље проводним тлом. У критичним случајевима проблем је могуће ријешити, или бар умањити, додавањем проводне смјесе у околину уземљивачких електрода. Најчешће се у ову сврху користи бентонит [68],[76]-[78]. Бентонит је природни материјал веома мале специфичне електричне отпорности (2,5 Ωm). Има веома изражену способност упијања влаге из околног тла (хидрофобност) усљед чега је скоро увијек влажан и самим тим добро проводан. Експерименти са бентонитом у тлу специфичне електричне отпорности од 700 Ωm до 1400 Ωm и са струјама од 8 kA до 34 kA показују смањење импедансе уземљивача у опсегу од 21% до 41% [78]. Примјеном велике количине бентонита добија се смањење од 45% до 73% [78]. Додавање бентонита око уземљивачких електрода утиче и на смањење њихове ефективне дужине и то у опсегу од 10% до 20% [78].

2.4. Избор одговарајућег изолационог нивоа

Познато је да појава прескока на ваздушној изолацији зависи од много фактора, као што су дужина изолационог (међуелектродног) растојања, атмосферски услови (влажност ваздуха, ваздушни притисак, температура итд), запрљаност изолаторских ланаца, облик електрода и међуелектродног простора, поларитет примјењеног напона и слично. Вјероватноћа појаве прескока на изолатору приликом дјеловања ударног напона U_u се најчешће представља преко Гаусове кумулативне расподеле која је дефинисана изразом (2.1):

$$P = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \int_{-\infty}^{U_u} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{U-U_{50\%}}{\sigma}\right)^2} dU \quad (2.1)$$

гдје је: P - вјероватноћа појаве прескока на изолаторском ланцу када на изолатор дође атмосферски пренапон амплитуде U_u ,

- $U_{50\%}$ - вриједност 50%-тног прескочног напона [kV],
- σ - стандардно одступање у односу на $U_{50\%}$ [p.j]. Стандардно одступање σ за атмосферске пренапонске таласе износи између 1% и 3%.

На основу израза (2.1) дефинише се подносиви ударни напон изолације (BIL - Basic Lightning Insulation Level) (2.2):

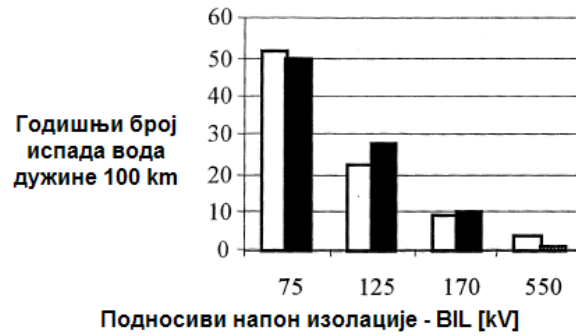
$$BIL = U_{50\%} \cdot (1 - 1,28 \cdot \sigma) \quad (2.2)$$

гдје је: $U_{50\%}$ - вриједност 50% прескочног напона [kV],
 σ - стандардно одступање у односу на $U_{50\%}$ [p.j].

Вјероватноћа појаве прескока на изолаторском ланцу, када је примјењени напон по амплитуди једнак подносивом напону изолације (BIL), је 10%. Подносиви напон и 50%-тни прескочни напон изолаторског ланца се одређују лабораторијским испитивањима примјеном стандардног ударног атмосферског напона облика 1,2/50 $\mu\text{s}/\mu\text{s}$. Стандардне вриједности подносивих напона изолације вода у функцији његовог максималног радног напона су дефинисане у стандарду IEC:2006 60071-1 [79]. На напонским нивоима у опсегу од 1 kV до 245 kV за дефинисање подносивих напона изолације се користе стандардни подносиви ударни атмосферски пренапон и краткотрајни подносиви пренапон индустријске учестаности. На вишим напонским нивоима (≥ 245 kV) дефинисање подносивих напона изолације се врши на бази стандардних подносивих ударних атмосферских и склопних пренапона. Разлог томе је што утицај склопних пренапона расте са повећањем максималног радног напона вода и постаје доминантан у односу на краткотрајне пренапоне индустријске учестаности.

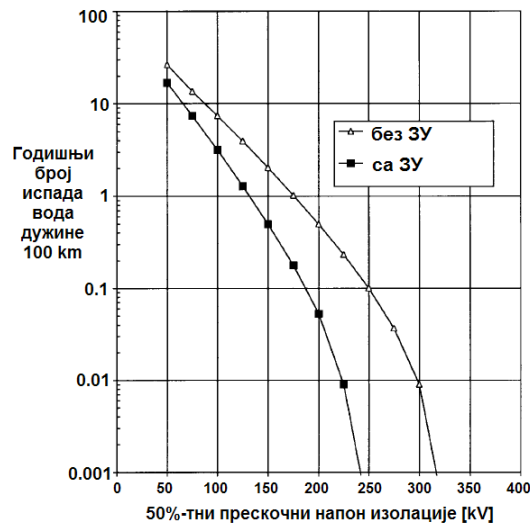
Изолациони ниво надземног вода није одређен само подносивим ударним напонам изолаторских ланаца него и изолационим растојањима између фазних проводника и између фазних проводника и уземљених дијелова надземног вода (стубови и заштитна ужад). Вриједности минималних изолационих растојања су у корелацији са изолационим нивоом вода и дефинисане су у стандарду IEC:2006 60071-1 [79]. Димензионисање изолационих растојања на надземном воду је објашњено у истом стандарду.

Изолациони ниво надземних водова има велики утицај на угроженост вода од атмосферских пренапона. Висок изолациони ниво је разлог због кога преносни водови имају много мање испада из погона узрокованих атмосферским пренапонима у односу на дистрибутивне водове. На слици 2.7 је приказан годишњи број испада из погона узрокованих атмосферским пренапонима надземних водова са подносивим напонима изолације од 75 kV, 125 kV, 170 kV и 550 kV који редом одговарају водовима са називним напонам од 10 kV, 20 kV, 35 kV и 110 kV [23]. Резултати (црни и бијели стубови) су добијени кориштењем два различита софтверска алата. Повећањем називног напона вода, односно подносивог напона његове изолације, значајно се смањује годишњи број испада вода из погона који су узроковани дјеловањем атмосферских пренапона.



Слика 2.7 – Зависност годишњег број испада вода из погона узрокованих дјеловањем атмосферских пренапона од подносивог напона изоације вода [23]

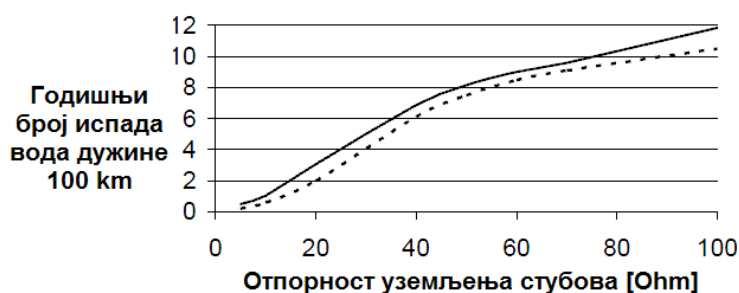
Атмосферска пражњења у тло у околини надземног вода узрокују појаву индукованих напона на фазним проводницима вода. На слици 2.8 је приказан утицај 50%-тног прескочног напона изоације дистрибутивног вода на годишњи број његових испада из погона који су узроковани индукованим напонима на његовим фазним проводницима [80]. Ознака ЗУ означава постојање заштитног ужета на воду. У прорачуну је усвојено да је висина вода једнака 10 m, а густина атмосферских пражњења у околини вода је 1 пражњење/km²/год. Повећањем подносивог напона изоације вода утицај индукованих напона знатно опада.



Слика 2.8 – Утицај 50%-тног прескочног напона изоације дистрибутивног вода на годишњи број испада из погона који су узроковани индукованим напонима [80]

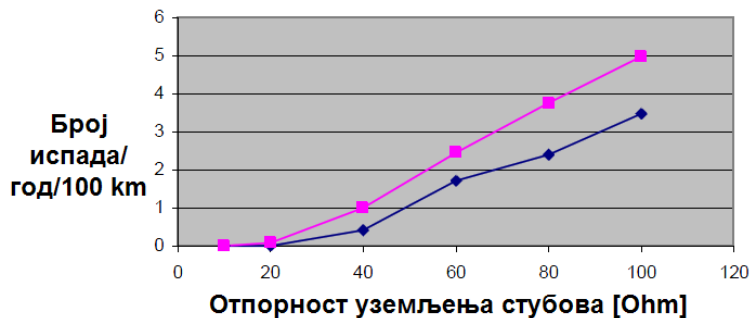
Избор изоационог напона надземног вода директно зависи од називног напона вода, тј. од његовог максималног радног напона. Нпр. за надземни вод називног напона 110 kV, који има максимални радни напон од 123 kV, подносиви атмосферски напон може бити 450 kV, 550 kV или 650 kV [79]. На слици 2.9 је

приказан утицај 10%-тног повећања подносивог напона изолације 90 kV вода на годишњи број његових испада из погона узрокованих атмосферским пренапонима [34]. Корист од оваквог повећања подносивог напона изолације вода је минимална, поготово у случају већих вриједности отпорности уземљења стубова. С друге стране, изградња 110 kV са подносивим напонем изолације од 850 kV, који се користи на 220 kV воду, није економски оправдана и не користи се као мјера заштите.



Слика 2.9 – Утицај повећања подносивог напона изолације 90 kV надземног вода за 10% на годишњи број испада узрокованих атмосферским пренапонима [34]

Неуравнотежена изолација (unbalanced insulation) различитих система двосистемског или вишесистемског вода се користи да би се спријечила појава њихових истовремених испада из погона усљед дјеловања једног атмосферског пражњења [81]. Заштита се реализује тако што се усвоје мале разлике између подносивих напона изолације различитих система. На слици 2.10 је илустровано значајно смањење годишњег броја истовремених испада из погона двосистемског вода усљед благог повећања изолационог напона једног система [34].



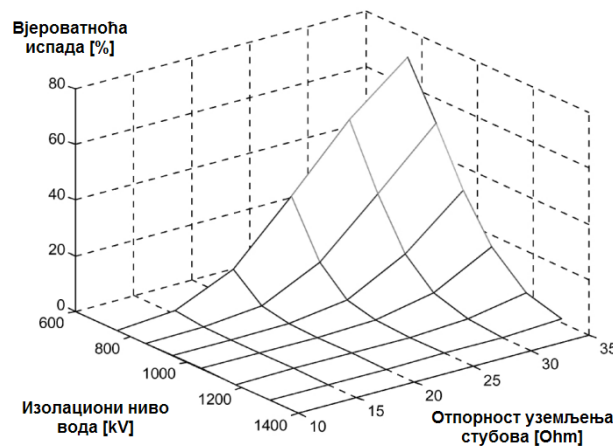
Слика 2.10 – Број двосистемских испада вода у зависности од отпорности уземљења стубова и подносивих напона изолације његових система [34]

- подносиви напони изолације система 1 и 2 су редом једнаки 800 kV и 840 kV
- ◆- подносиви напони изолације система 1 и 2 су редом једнаки 800 kV и 890 kV

2.5. Ефикасност и ограничења стандардних система заштите

Стандардни системи заштите надземних водова од атмосферских пренапона могу осигурати мали број испада штићеног вода само у случајевима када су испуњени сљедећи услови:

1. Вод је снабђевен заштитним ужетом и има адекватан заштитни угао.
2. Вод је изграђен у области са малом грмљавинском активношћу. У овом случају на вод ће годишње дјеловати мали број атмосферских пренапона тако да ни укупан број испада не може бити значајан.
3. Вод има висок изолациони ниво, слика 2.11 [75]. Нпр. 400 kV вод са великом вриједношћу отпорности уземљења стубова ће имати мали годишњи број испада из погона чак и у области са израженом грмљавинском активношћу.
4. Вод има малу вриједност отпорности уземљења стубова, слика 2.11. Са повећањем изолационог напона вода може да се повећа и отпорност уземљења његових стубова.



Слика 2.11 – Вјероватноћа испада из погона преносних водова у функцији изолационог напона и отпорности уземљења њихових стубова [75]

Проблематика громобранске заштите надземних водова постаје знатно сложенија ако неки од горњих услова није испуњен, а поготово ако више њих истовремено није испуњено. Због тога се може десити да вод има велики годишњи број испада из погона узрокованих дјеловањем атмосферских пренапона упркос примјени стандардних система заштите. У таквим случајевима на воду се додатно мора примјенити и неки од специјалних система заштите.

3. Специјални системи заштите надземних водова од атмосферских пренапона

Специјални системи заштите се примјењују на критичним надземним водовима у циљу смањења њиховог неприхватљиво великог годишњег броја испада из погона који су узроковани атмосферским пренапонима. Специјални системи заштите се користе као надградња на стандардне системе заштите, у случајевима када они показују недовољну ефикасност. У специјалне системе заштите надземних водова од атмосферских пренапона спадају:

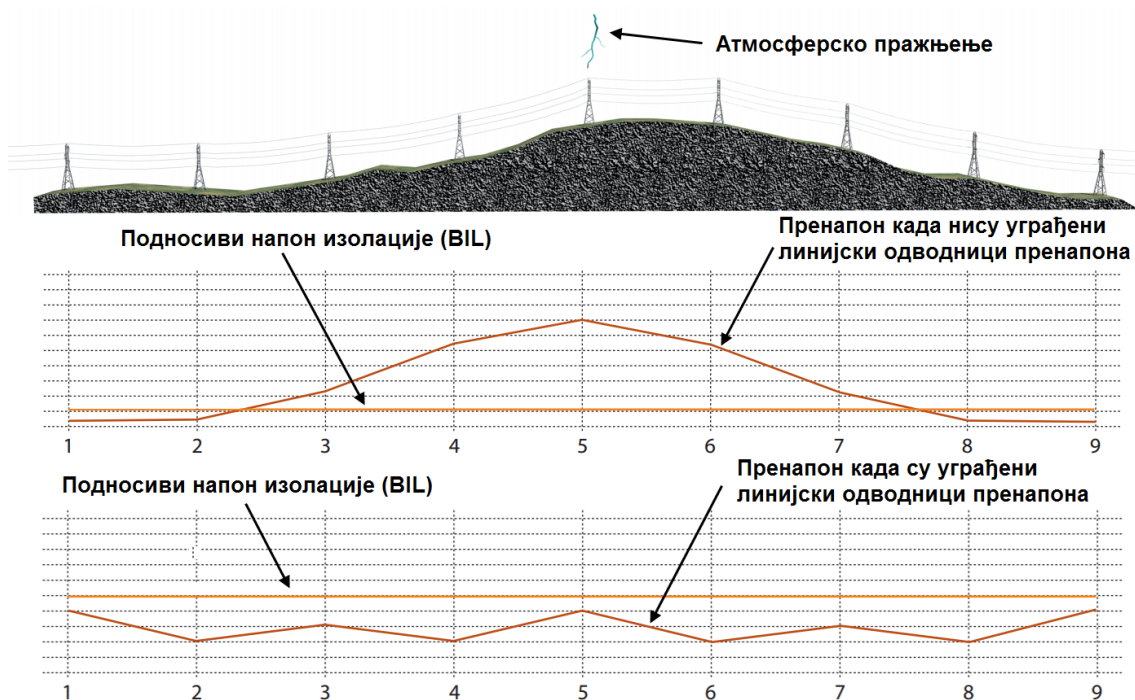
1. Линијски одводници пренапона.
2. Земљоводна ужад (underbuilt wires).
3. Затезна ужад (guy wires).
4. Нестандардни системи заштите од директних атмосферских пражњења у фазне проводнике.

3.1. Линијски одводници пренапона

Линијски одводници пренапона представљају уређаје који се постављају паралелно изолаторским ланцима, а улога им је да ограниче амплитуду атмосферског или склопног пренапона испод подносивог напона изолаторског ланца. На тај начин се спречава појава прескока на изолатору. Прве публикације које се баве могућностима примјене линијских одводника пренапона за заштиту надземних водова од атмосферских пренапона су се појавиле давне 1905. године [5],[6]. Ипак, масовнија примјена линијских одводника пренапона је почела 90-тих година 20. вијека, а били су базирани на металоксидним (ZnO) нелинеарним елементима који су откривени 60-тих година 20 вијека [82].

Суштина заштите која се базира на примјени линијских одводника пренапона је графички приказана на слици 3.1 [83]. Циљ уградње линијских одводника пренапона је да се максимални атмосферски пренапони на надземном воду редукују испод подносивог напона изолације. Када на воду нису уграђени линијски одводници максимални атмосферски пренапони знатно превазилазе подносиви напон изолације тако да се на воду дешавају повратни прескоци. Након уградње линијских одводника пренапона на сваку фазу свих 9 посматраних стубова висина атмосферских пренапона је ограничена испод подносивог напона

изолације и квар на штићеном дијелу трасе вода узрокован атмосферским пражњењима се не може догодити.



Слика 3.1 – Заштита вода помоћу линијских одводника пренапона [83]

Данас се најчешће користе двије врсте линијских одводника пренапона:

1. Линијски одводници без спољашњег искришта - NGLA (No Gapped Lightning Arresters). Због непостојања искришта њихови нелинеарни отпорници су трајно везани на радни напон.
2. Линијски одводници са спољашњим искриштем - EGLA (External Gapped Lightning Arresters). Због постојања искришта њихови нелинеарни отпорници нису трајно везани на радни напон.

Обје врсте линијских одводника пренапона се готово увијек конструишу у полимерном кућишту од силиконске гуме. Основне предности и недостаци обје врсте линијских одводника пренапона се могу наћи у [34]. Више података о карактеристика линијских одводника пренапона, уређајима за мониторинг њиховог стања, спојној и овјесној опреми која се користи приликом њихове уградње итд. се може наћи у [84].

3.1.1. Линијски одводници пренапона на преносним водовима

Употреба линијских одводника пренапона на преносним надземним водовима је почела раних 90-тих година. Постоји велики број радова у којима се анализира ова проблематика [34],[85]-[105].

Године 1991. у Мексику је реализована пренапонска заштита надземних водова напонског нивоа 69 kV примјеном линијских одводника пренапона [89]. Линијски одводници пренапона су 1999. године почели да се примјењују и на 115 kV водовима у саставу мексичке електропривреде. Први вод који је штићен, La Angostura-Belizario, се налазио у јужним дијеловима државе и имао је велики годишњи број испада узрокованих атмосферским пренапонима [91],[92]. У табели 3.1 је приказан просјечан годишњи број испада из погона посматраног 115 kV вода прије и након уградње линијских одводника пренапона [91],[92].

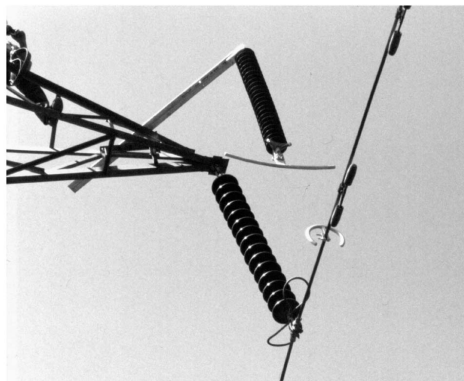
Табела 3.1 – Годишњи број испада 115 kV вода узрокованих атмосферским пренапонима прије и након уградње линијских одводника пренапона [91]

Дио трасе вода	Просјечан годишњи број испада			Број и врста линијских одводника
	прије уградње линијских одводника (1984. до 1992. године)	након уградње линијских одводника		
		1993. године	1994. године	
I	14,50	8	4	40 - без искришта
II	14,55	6	4	47 - са искриштем
III	14,88	8	5	60 - без искришта

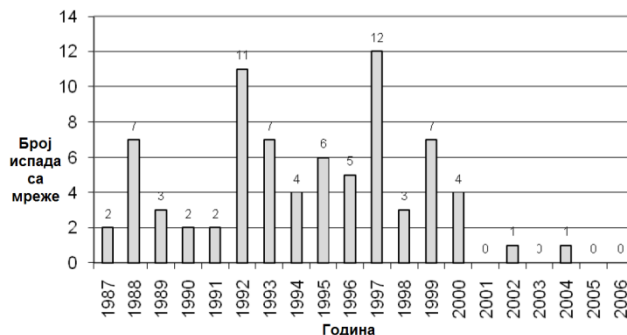
У то вријеме линијски одводници пренапона су успјешно примјењени и у Бразилу на воду Ouro Preto–Mariana називног напона 138 kV који је имао 41 испад/год/100 km из погона узрокован атмосферским пренапонима [90]. Након уградње линијских одводника пренапона у сваку фазу сваког стуба тог вода годишњи број његових испада из погона је сведен приближно на нулу.

У Мексику је 2002. године покренут пројекат примјене линијских одводника пренапона на критичним 230 kV и 400 kV водовима са хоризонталним распоредом проводника [16],[93]. На 230 kV воду је уграђен 61 линијски одводник пренапона, док је на 400 kV воду уграђено 13 линијских одводника пренапона. Одводници су уграђивани у спољашње фазе критичних распона. На слици 3.2 а) је приказан

линијски одводник пренапона са спољашњим искриштем на 230 kV воду, а на слици 3.2 б) њихов утицај на смањење годишњег броја испада штићеног вода из погона [16],[93].



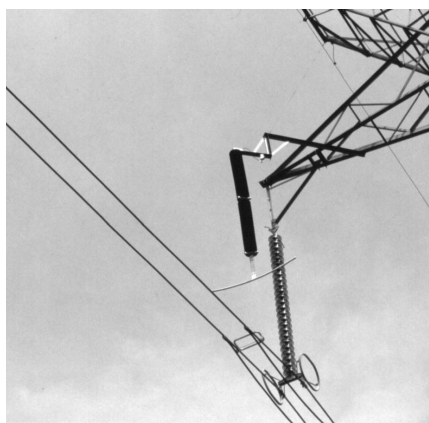
а)



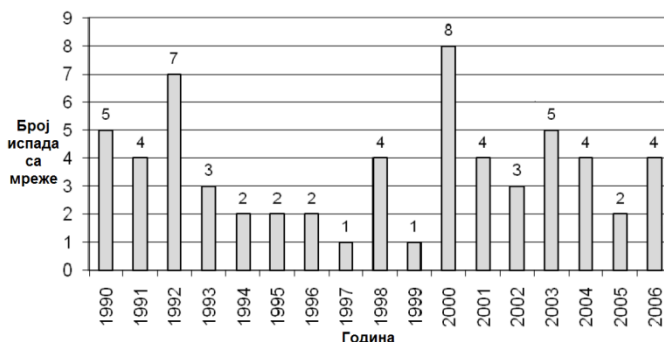
б)

Слика 3.2 – а) Линијски одводник пренапона са спољашњим искриштем и б) њихов утицај на годишњи број испада штићеног 230 kV вода [16],[93]

На слици 3.3 а) је приказан линијски одводник пренапона са спољашњим искриштем на 400 kV воду, а на слици 3.3 б) њихов утицај на годишњи број испада штићеног вода [16],[93]. У случају 400 kV вода није уочено побољшање перформанси вода након уградње линијских одводника пренапона. Највјероватнији разлог овом резултату је што је уграђен мали број линијских одводника пренапона па су се кварови дешавали на дијеловима трасе који нису штићени. Овај примјер показује важност локације уградње и броја уграђених линијских одводника пренапона на воду.



а)



б)

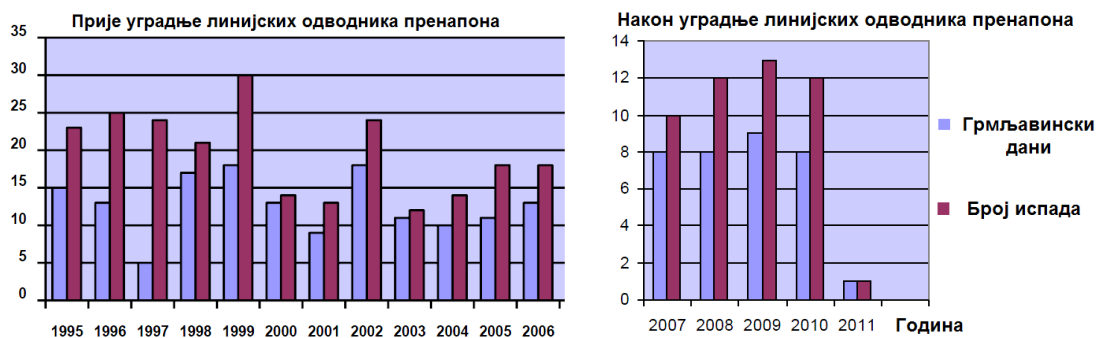
Слика 3.3 – а) Линијски одводник пренапона са спољашњим искриштем и б) његов утицај на годишњи број испада 400 kV вода [16],[93]

Линијски одводници пренапона су кориштени за заштиту преносних водова и у нашем окружењу. Надземни једносистемски вод са вертикалним распоредом проводника Комолац-Стон називног напона 110 kV и дужине 44 km је имао велики годишњи број испада из погона узрокованих атмосферским пренапонима. Вод је саграђен близу мора у области са израженом грмљавинском активношћу и на тлу велике специфичне електричне отпорности. У јулу 2007. године вод је заштићен помоћу 110 линијских одводника пренапона без спољашњег искришта. Начин реализовања заштите је детаљно описан у [94]-[98]. На 62 стуба линијски одводник пренапона је постављен у доњој фази, а на 24 стуба су уграђена два линијска одводника пренапона, у доњој и у средњој фази [94]. На слици 3.4 је приказан линијски одводник пренапона без спољашњег искришта постављен у доњој фази 110 kV вода Комолац–Стон [94]. Код вода са вертикалним распоредом проводника се сматра да је доња фаза најугроженија од атмосферских пренапона јер има најслабију електромагнетну спрегу са заштитним ужетом [99].



Слика 3.4 – Линијски одводник пренапона без спољашњег искришта постављен у доњој фази 110 kV вода Комолац–Стон [94]

Укупан број грмљавинских дана и укупан број испада вода из погона у току године дана прије и након уградње линијских одводника пренапона су приказани на слици 3.5 [94]. Након уградње линијских одводника пренапона на воду је регистровано 35% мање испада из погона узрокованих атмосферским пренапонима чиме је знатно повећана његова поузданост.



Слика 3.5 – Годишњи број грмљавинских дана и годишњи број испада из погона 110 kV надземног вода Комолац–Стон [94]

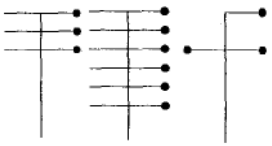
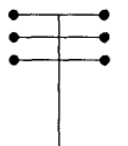
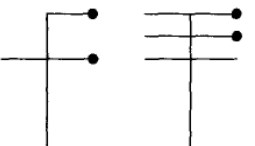
Линијски одводници пренапона се често користе и за заштиту двосистемских и вишесистемских водова који су посебно угрожени од атмосферских пренапона јер једно пражњење може да изазове истовремени испад из погона два или више система. Примјена линијских одводника пренапона за заштиту двосистемског вода називног напона 123 kV који није снабђевен заштитним ужетом и који на истим стубовима има и 33 kV вод је анализирана у [100]. У [34],[101] је анализирана примјена линијских одводника пренапона на четверосистемском воду са два заштита ужета, чија два горња система имају називни напон од 275 kV, а два доња система имају називни напон од 132 kV.

Први линијски одводници пренапона у Јапану су уграђени 1980. године на 77 kV воду и били су без екстерног искришта. До 2002. године укупан број уграђених јединица је био око 83111, од чега 86% на водовима са називним напоном између 66 kV и 77 kV [102]. Разлог томе је што су ови водови, због ниског подносивог напона изолације, знатно угроженији од атмосферских пренапона у односу на нпр. 400 kV водове, али су истовремено много важнији за систем у односу на дистрибутивне водове. Од 83111 уграђених линијских одводника пренапона њих 83042 или 99% је са спољашњим искриштем, док је само 69 одводника без спољашњег искришта. Разлози томе су што након квара одводника пренапона са спољашњим искриштем систем може несметано да ради са сниженим подносивим напоном изолације без опасности од компликација повезаних са одвајањем оштећеног одводника од напона. Други битан разлог је што линијски одводник пренапона није трајно изложен дјеловању радног напона чиме му се знатно продужава радни вијек.

У табели 3.2 су приказани различити начини уградње линијских одводника пренапона, као и број уграђених јединица у преносној мрежи Јапана [102]. Присуство линијског одводника пренапона у некој фази је назначено црном тачком. Конфигурација 1 се користи за заштиту вишесистемских водова од истовремених испада из погона више система истих називних напона, али се користи и за заштиту једносистемских водова. Конфигурација 1 је примјењена у 99,4% случајева. Конфигурација 2 се користи за заштиту веома угрожених и веома важних водова и примјењена је у 0,5% случајева. Конфигурација 3 се користи у случају водова са могућношћу једнофазног или вишефазног АПУ-а и примјењена је у 0,1% случајева.

Ефикасност конфигурације 1 је испитивана на 13 двосистемских водова називног напона 77 kV [102]. Посматрање је вршено у периоду од 1983. до 1987. године прије уградње линијских одводника пренапона, односно у периоду од 1991. до 1993. године, након уградње линијских одводника пренапона. Број једносистемских испада вода из погона се након уградње линијских одводника пренапона смањено са 12,2 испада/год/100 km на нулу за штићени систем, односно са 11,3 испада/год/100 km на 6,1 испада/год/100 km за нештићени систем. Укупан број двосистемских испада је смањен са 6,5 испада/год/100 km на нулу.

Табела 3.2 – Начини уградње и број уграђених линијских одводника пренапона у преносној мрежи Јапана [102]

Конфигурација	1	2	3	Укупно уграђених одводника
линијских одводника пренапона				
Називни напон	Број уграђених одводника			
< 66 kV	1398	6	0	1404
66 ÷ 77 [kV]	71088	420	0	71508
110 ÷ 154 [kV]	8229	0	56	8285
187 ÷ 275 [kV]	1860	0	0	1860
500 kV	54	0	0	54
Укупно	82629	426	56	83111

У Кини је до краја 1999. године на надземним водовима називних напона од 35 kV до 500 kV уграђено око 10840 линијских одводника пренапона, и то око 4000 одводника на 35 kV водовима, 830 одводника на 66 kV водовима, 4000 одводника на 110 kV водовима, 2000 одводника на 220 kV водовима и 6 одводника на 500 kV водовима [103]. До 2006. године уграђено је додатних 20000 линијских одводника пренапона.

У радовима [104],[105] је описана примјена линијских одводника пренапона за заштиту од атмосферских пренапона дугих распона 230 kV вода који су без заштитног ужета. Вод је дуг 100 km, налази се у Канади и направљен је како би се на мрежу повезала два вјетропарка снага 100,5 MW и 211,5 MW. Вод је специфичан због тога што има седам распона дужине између 1200 m и 1700 m. Заштитна ужад на тако дугим распонима представљају велико механичко оптерећење за стубове и темеље вода. Проблем је израженији због чињенице да је вод грађен у области у којој се често јављају ледене кише. Скупљање леда по фазним проводницима и заштитним ужадима би довело до неприхватљиво великог механичког напрезања стубова. Због тога дуги распони вода немају заштитно уже. Како не би били потпуно незаштићени одлучено је да се штите помоћу 42 линијска одводника пренапона са екстерним искриштем који су постављени на све три фазе стубова на нештићеним распонима.

3.1.2. Линијски одводници пренапона на дистрибутивним водовима

Дистрибутивни надземни водови су веома угрожени и од директних и од индиректних атмосферских пражњења због свог ниског подносивог напона изолације. Велики број њихових испада из погона ће у већини случајева бити прихватљив јер они електричном енергијом углавном снабдијевају мање важне потрошаче. Ипак, постоје дистрибутивни надземни водови који имају велику важност због осјетљивих потрошача које напајају и њихов број испада из погона мора бити мали.

Основно заштитно средство угрожених надземних дистрибутивних водова од атмосферских пренапона су линијски одводници пренапона. Остале мјере заштите као што су повећање изолационог напона вода, уградња заштитног ужета итд. могу знатније да смање једино број испада из погона узрокованих индукованим напонима, али не и испале узроковане директним пражњењима у вод [106].

Примјена линијских одводника пренапона на 20 kV воду Петехи дужине 17,5 km који се налази у дистрибутивној мрежи Електроистра Пула, Хрватска, је описана у [107]. Заштита је реализована у априлу 2008. године, а укупно је штићено десет критичних стубова. Линијски одводници пренапона са екстерним искриштем су уграђивани у све три фазе штићеног стуба, слика 3.6 [107]. Након годину и по дана експлоатације утврђене су укупно 53 прораде линијских одводника пренапона, што значи да је укупан број испада вода са мреже смањен за око 53 у току године и по дана. Поред тога, укупан број интервенција на воду је смањен са 12, колико их је било у години прије уградње линијских одводника пренапона, на свега 3 у години након њихове уградње.



Слика 3.6 – Глава 20 kV стуба са уграђеним линијским одводницима пренапона са екстерним искриштима [107]

У [80] је показано је да би вод са 50%-тним подносивим напоном изолације од 350 kV и са линијским одводницима пренапона постављеним на сваком другом стубу имао ефикасност заштите од директних атмосферских пражњења од само 30%. У случају постављања линијских одводника на сваком трећем стубу ефикасност заштите би пала на 20%. Због тога се веома важни и веома угрожени дистрибутивни водови од директних атмосферских пражњења требају штити примјеном линијских одводника пренапона постављених у свим фазама и на сваком стубу вода [106]. Поред тога, вод мора бити снабђевен заштитним ужетом како би се смањило енергетско напрезање линијских одводника [33],[58],[108]-[110].

У случају примјене линијских одводника пренапона на дистрибутивним надземним водовима који нису снабђевени заштитним ужетом постоји велика вјероватноћа појаве њиховог термичког уништења због превазилажења енергетске апсорбционе моћи, табела 3.3 [33].

Табела 3.3 – Вјероватноћа квара линијског одводника пренапона усљед директних пражњења у дистрибутивни вод без заштитног ужета [33]

Енергетска апсорбциона моћ одводника пренапона	Вјероватноћа квара
ниска - $3,0 \text{ kJ/kV}_{\text{MCOV}}$	33%÷100%
средња - $4,8 \text{ kJ/kV}_{\text{MCOV}}$	17%÷50%
висока - $6,7 \text{ kJ/kV}_{\text{MCOV}}$	12%÷33%

Подаци из табеле 3.3 се односе на дистрибутивне водове са три фазна и нултим проводником, на којима је свака фаза на сваком стубу штићена линијским одводницима пренапона. Одводници ниске апсорбционе моћи се користе за заштиту подземних каблова, док се одводници средње и високе апсорбционе моћи користе за заштиту надземних водова.

Иако постоји велика вјероватноћа појаве квара линијског одводника пренапона приликом појаве директних атмосферских пражњења у штићени дистрибутивни вод, очекивани број таквих догађаја на годишњем нивоу је мали [33]. То је показано на примјеру 13,2 kV дистрибутивног система дужине 50 km кога чине главни трофазни доводи и једнофазни одводи [33]. Такав систем има око 1000 стубова и 2000 линијских одводника пренапона. На отвореном терену такав вод би годишње прихватао око 20 директних пражњења у области са великом грмљавинском активношћу, нпр. Флорида. Усљед тога би годишње дошло до уништења између 2 и 7 линијских одводника пренапона високе енергетске апсорбционе моћи. Након што се у обзир узме заклоњеност вода околним објектима, као и смањен број пражњења у вод у областима са стандардним климатским условима број уништења линијских одводника пренапона се смањује на 1 до 2 годишње, што је у сагласности са [108].

Енергетско напрезање линијских одводника пренапона на дистрибутивним водовима је анализирано у великом броју радова примјеном нумеричких симулација [109],[110], примјеном ударних струјних генератора [110] па чак и

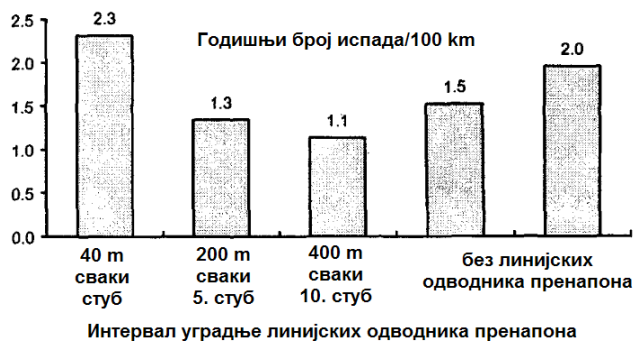
изазивањем тригераних пражњења у експерименталне водове [111]-[113]. Опште је познато да се примјеном заштитног ужета може постићи значајно смањење њиховог енергетског напрезања [33],[109]-[110]. Додатне појединости у вези са њиховим енергетским напрезањем су дефинисане у [109]:

1. Енергетско напрезање линијских одводника пренапона у случају вода без заштитног ужета је 3 до 5 пута веће него у случају вода са заштитним ужетом.
2. Повећање интервала уграде линијских одводника пренапона са 40 m на 160 m на воду без заштитног ужета доводи до повећања вјероватноће појаве квара одводника за 35%. Разлог томе је слабија расподела апсорбоване енергије између сусједних одводника.
3. Вјероватноћа појаве квара линијских одводника пренапона се уградњом заштитног ужета смањује за 70÷80%, а двоструким повећањем енергетске апсорбционе моћи одводника за 30÷50%.
4. Смањењем отпорности уземљења стубова вода са заштитним ужетом са 100 Ω на 30 Ω могуће је смањити вјероватноћу појаве квара линијских одводника пренапона за око 30%. Разлог томе је интензивније одвођење струје (енергије) атмосферског пражњења у тло. У случају вода без заштитног ужета смањење износи само 3%.

Линијски одводници пренапона се на дистрибутивном воду без заштитног ужета често користе за заштиту од индукованих напона. Ови напони могу узроковати велики годишњи број испада дистрибутивних водова из погона. Разлог томе је што и веома удаљена атмосферска пражњења могу узроковати критично високе индуковане напоне на воду, нпр. пражњења које је 1000 m удаљено од 10 kV вода може да изазове његов испад из погона [23]. Утицај индукованих напона на перформансе дистрибутивног вода опада са порастом његовог подносивог напона изолације, са повећањем удаљености мјеста пражњења до вода, са смањењем амплитуде струје пражњења, са примјеном заштитних ужади, са смањењем дужине вода и слично. Енергија индукованих напона је мала тако да они не могу изазвати термичко оштећење линијских одводника пренапона. Потпуно елиминисање могућности појаве испада дистрибутивног вода из погона усљед дјеловања индукованих атмосферских

напона може да се постигне без потребе да се линијски одводници пренапона уграђују на сваком стубу вода. Оптимално растојање између сусједних одводника пренапона у истој фази према различитим ауторима износи 200 m [61], 200 m [59],[108], 150÷300 m [114] и 300 m [115]. При томе се линијски одводници пренапона морају користити у свим фазама вода.

Упркос великом броју радова који презентују позитивна експлоатациона искуства са линијским одводницима пренапона на дистрибутивним водовима, постоје и радови у којима је писано о њиховој ниској ефикасности. У [116] је анализирана ефикасност примјене линијских одводника пренапона без екстерног искришта за заштиту 13,2 kV дистрибутивних водова у САД, држава Њујорк. Заштита је реализована 1993. године на три дистрибутивна вода. Водови су имали четири проводника (три фазе и нула), а линијски одводници пренапона су уграђивани у све три фазе. На I воду линијски одводници су уграђивани на сваком стубу (сваких 40 m), на II воду растојање између штићених стубова је било 200 m, а на трећем воду 400 m. Два вода нису штићена линијским одводницима пренапона и служили су за поређење перформанси штићених у односу на нештићене водове. Мониторинг свих пет дистрибутивних водова је рађен од августа 1993. године до септембра 1996. године. Кориштено је више техника регистрације атмосферских пражњења како би се са сигурношћу детектовали само испади узроковани атмосферским пренапонима. Као најзначајнији резултат рада је наведена чињеница да водови који су имали уграђене линијске одводнике пренапона нису имали боље перформансе од нештићених водова, слика 3.7 [116]. При томе је већина испада била узрокована директним пражњењима у вод, а мањи број пражњењима у околно тло.



Слика 3.7 – Регистровани испади из погона дистрибутивних водова узроковани атмосферским пренапонима [116]

Изузетно је занимљив податак да је вод који је имао линијске одводнике пренапона уграђене на скоро свакој фази и на скоро сваком стубу имао највише испада изазваних атмосферским пренапонима, слика 3.7. Накнадно је утврђено да је на том воду уграђено 1230 линијских одводника пренапона (око 89% од максималног броја), око 131 одводник, односно 10,7%, је недостајао, док су 2 одводника, односно 0,16%, били уништени. Укупан број уништених линијских одводника на свим водовима је био веома мали (између 0,05% до 0,08%). Узрок овако слабој ефикасности заштите није јасан, а дјелимично је објашњаван чињеницом да су се прескоци дешавали на дијеловима трасе вода који нису штићени линијским одводницима пренапона. Међутим, наведено је да су се неки од испада догодили на дионицама на којима су сви стубови и све фазе сигурно били заштићени. Занимљиво је споменути да су регистровани случајеви да се пражњење деси у фазни проводник близу штићеног стуба, а да се прескок догоди на сљедећем нештићеном стубу и то на двије од три фазе [116].

Тумачење резултата приказаних у [116] се може базирати на резултатима експеримената који су реализовани примјеном тригераних пражњења [111]-[113]. У тим експериментима је констатован значајан број прескока у распону дистрибутивног вода у случају када се пражњење одвија у средину распона. У случају вода са хоризонталним распоредом проводника 24% од 34 тригерана пражњења су изазвала међуфазне прескоке. У случају вода са вертикалним распоредом проводника овај резултат је знатно критичнији, у 92% случајева од укупно 13 пражњења у 2001. години, у 91% случајева од 43 пражњења у 2002. години и у 85% случајева од укупно 26 пражњења у 2003. години је изазвало међуфазне прескоке. При томе је међуфазно растојање на воду са хоризонталним распоредом проводника износило 70 cm и било је краће од међуфазног растојања на воду са вертикалним распоредом проводника које је износило 80 cm.

Изузетно значајан резултат који је добијен експериментима реализованим примјеном тригераних пражњења је да није утврђено да паралелан рад два линијска одводника пренапона може смањити вјероватноћу термичког уништења појединачног одводника у односу на случај када се користи само један одводник по фази [111]-[113].

3.1.3. Специјалне конструкције линијских одводника пренапона

Поред стандардних типова линијских одводника пренапона који су анализирани у претходна два поглавља у задњих неколико година је представљено више типова линијских одводника пренапона нестандартне конструкције. Такви одводници пренапона су првенствено развијени од стране руске компаније „Streamer Electric Company“. Основне предности нестандартних типова линијских одводника пренапона су једноставна конструкција, мала маса и знатно нижа цијена у поређењу са стандардним типовима линијских одводника.

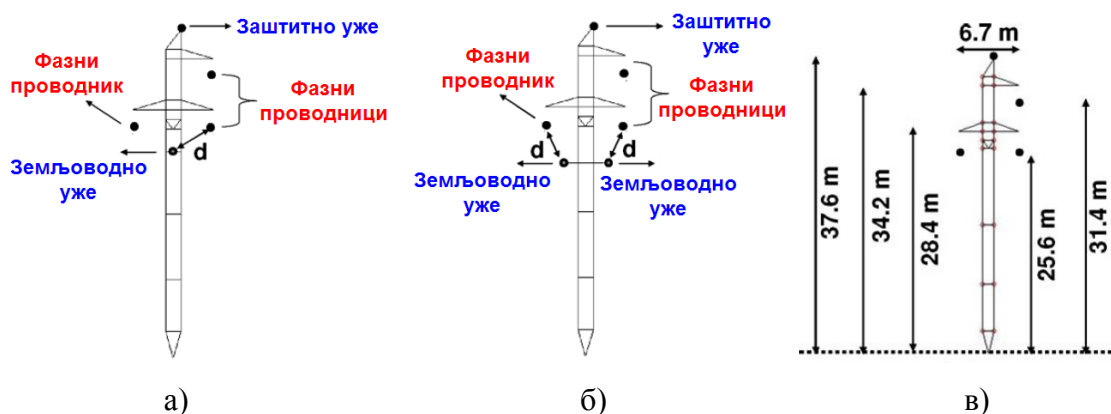
Вишекоморни одводници пренапона су описани у радовима [117]-[121], а намијењени су за заштиту дистрибутивних надземних водова називних напона од 3 kV до 35 kV. Њихова модификована верзија су вишекоморни изолаторски одводници пренапона који се користе за заштиту надземних водова називних напона од 35 kV до 220 kV и више од директних атмосферских пражњења [117]-[121]. Одводници пренапона са дугим искриштем се користе за заштиту од индукваних напона [122]. Модуларни тип линијских одводника пренапона са дугим искриштем се користи за заштиту и против индукваних напона, али и против атмосферских пренапона који настају као посљедица директних атмосферских пражњења у водове [123],[124]. Линијски одводници пренапона са дугим искриштем типа антене представљају посебну врсту одводника пренапона са дугим искриштем и користе се за заштиту изолованих проводника или надземних кабловских водова од атмосферских пренапона [125].

3.2. Земљоводна ужад

3.2.1. Земљоводна ужад на преносним водовима

Земљоводна ужад (underbuilt wires) представљају металну проводну ужад која се постављају испод фазних проводника надземног вода. Улога им је да смање амплитуду атмосферских пренапона на изолаторским ланцима вода и тако смање вјероватноћу појаве испада вода из погона [72],[126]-[128]. Користи се једно или два земљоводна ужета, јер због међусобног екранирања примјена више ужади нема ни техничко ни економско оправдање. Примјер заштите надземног вода са вертикалним распоредом фазних проводника примјеном једног или два земљоводна ужета је приказан на слици 3.8 [72]. Земљоводна ужад се могу

користити на дужим или краћим дијеловима трасе вода, а минимално се штите два сусједна распона у околини критичног стуба [72]. Овај систем заштите има бољу ефикасност ако се земљоводна ужад поставе ближе фазним проводницима (краће растојање d на слици 3.8). Тиме се остварује боља електромагнетна спрега између фазних проводника и заштитних ужади, а смањује се и пад напона на конзоли стуба услед смањења струје која протиче кроз стуб. С друге стране, мора се водити рачуна о неопходним изолационим растојањима ужади према фазним проводницима како се њиховом уградњом не би нарушио подносиви напон изолације вода. Због постојања већег угиба фазних проводника у односу на ужад, критична тачка најкраћег растојања d се налази у распону вода.



Слика 3.8 – Заштита надземног вода са вертикалним распоредом проводника примјеном а) једног б) два земљоводна ужета и в) димензије стуба [72]

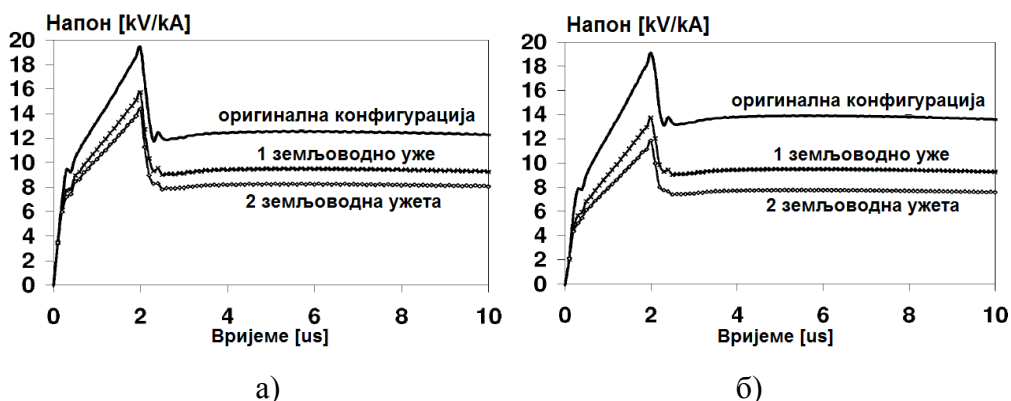
Заштитна улога земљоводног ужета се првенствено огледа у одвођењу дијела струје атмосферског пражњења услед чега се смањује струја која се одводи кроз стуб и његов уземљивач. На тај начин се смањују пренапони на конзоли стуба па се самим тим смањује и вјероватноћа појаве повратног прескока на воду. Овај ефекат је доминантан при већим отпорностима уземљења стубова ($\geq 40 \Omega$) [72]. Други битан ефекат је постојање електромагнетне спреге између фазних проводника, посебно најнижих, и земљоводног ужета. Услед тога се повећава амплитуда индукованих напона на фазним проводницима што доводи до смањења напона на изолаторском ланцу.

Земљоводна ужад су примјењена за заштиту 230 kV вода у Бразилу, у области Амазона. Заштита је реализована истовременом примјеном земљоводних ужади и четири затезна ужета (*guy wires*) на критичним стубовима вода. Примјена затезних ужади на надземним водовима ће бити анализирана у поглављу 3.3. Дужина

штићеног 230 kV вода је око 400 km, просјечна дужина распона вода износи око 500 m, а подносиви напон изолације је једнак 1,2 MV [127]. У области Амазона постоји веома интензивна грмљавинска активност и годишње се догоди велики број испада водова из погона узрокованих атмосферским пренапонима. Водови обично имају веома дуге распоне, а стубови су често постављени на врху брда. Услед снажне ерозије тла узроковане дјеловањем јаких киша са брда је најчешће однешен растресити материјал тако да је тло на њима углавном стјеновито и са великом специфичном електричном отпорношћу. Због тога стубови имају веома велике отпорности уземљења (од 100 Ω до 500 Ω) чак и у случајевима када се примјењују веома дугачке уземљивачке електроде [127].

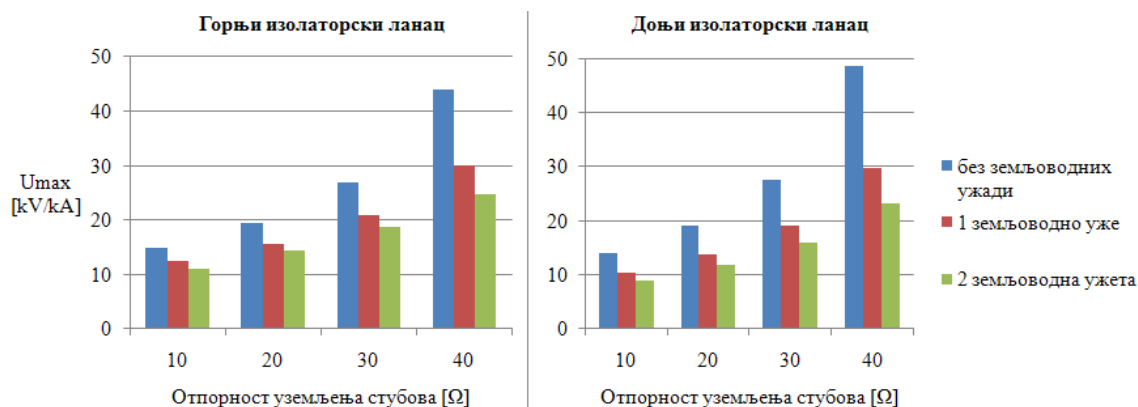
Детаљном анализом критичног 230 kV вода одређени су стубови дуж његове трасе (њих 26) на којима се дешава највећи број испада узрокованих атмосферским пренапонима и на којима је неопходно реализовати додатну заштиту [127]. Заштита базирана на примјени линијских одводника пренапона није прихваћена због великих потешкоћа са њиховим одржавањем у овим неприступачним предјелима, поготово у кишним периодима године.

Резултати нумеричких прорачуна ефикасности примјене земљоводних ужата на овом 230 kV воду су приказани на слици 3.9 [72]. Прорачуни су рађени у програмском пакету НЕМ [129]. Специфична електрична отпорност тла је усвојена да износи 1600 Ωm и њој одговара отпорност уземљења стубова од 20 Ω (вриједност је ниска због постојања уземљивача за четири затезна ужета). Усвојено мјесто атмосферског пражњења је врх стуба надземног вода, а кориштен је троугаони таласни облик струје са параметрима 2/50 $\mu\text{s}/\mu\text{s}$ [72]. Минимална дужина растојања d (слика 3.8) је усвојена да износи 4 m, јер би краће вриједности нарушиле изолационе карактеристике главе стуба. Уградњом једног земљоводног ужета максимални пренапон на конзоли стуба је смањен за око 19% и 28% за горњи и доњи изолаторски ланац респективно, док је приликом уградње другог земљоводног ужета пренапон на конзоли стуба смањен за око 26% односно 38% [72]. Инвестициони трошкови су са уградњом другог земљоводног ужета незнатно повећани тако да је препоручена уградња два земљоводна ужета.



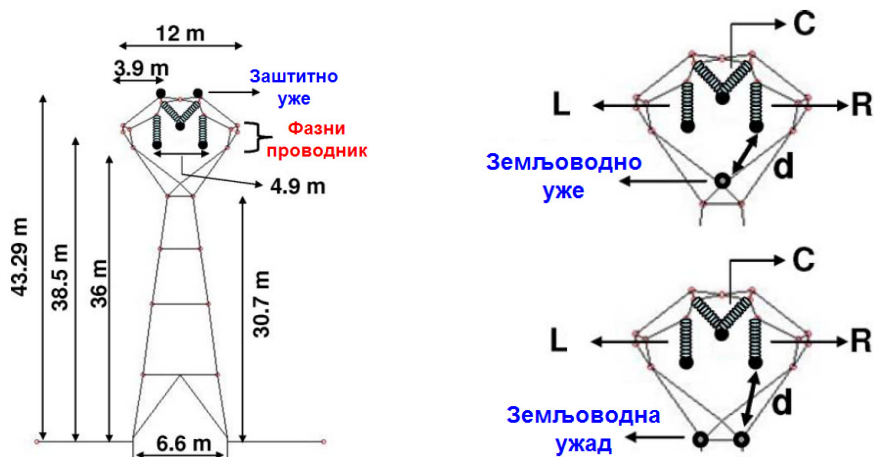
Слика 3.9 – Утицај земљоводних ужади на висину пренапона на а) горњој, б) доњој конзоли 230 kV стуба [72]

Прорачунати утицај отпорности уземљења стубова на ефикасност земљоводних ужади је приказан на слици 3.10 [72]. Ефикасност земљоводних ужади расте са порастом отпорности уземљења стубова што значи да је овај начин заштите погодан за угрожене водове изграђене на каменитом тлу на коме није могуће знатније побољшати карактеристике уземљивача стубова. Са порастом отпорности уземљења стубова струја атмосферског пражњења се отежано затвара у тло па се повећава амплитуда струје која се затвара кроз земљоводну ужад. Услед тога се знатно смањују пренапони на воду па самим тим и вјероватноћа појаве испада вода из погона.

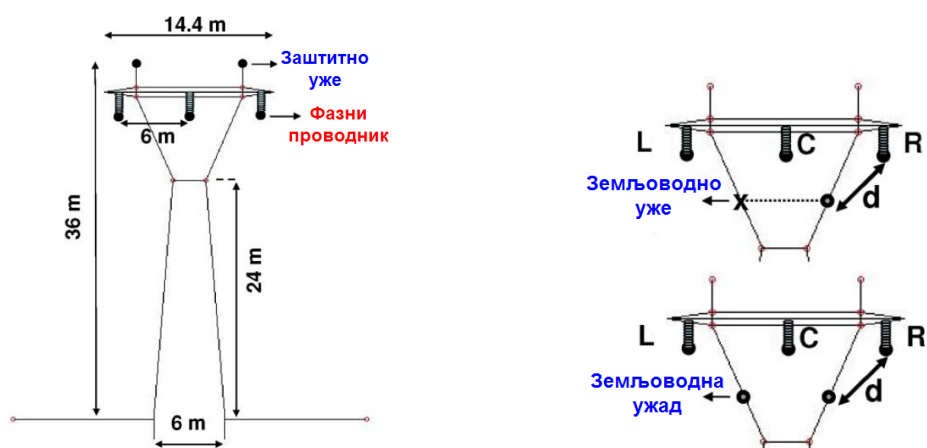


Слика 3.10 – Смањење максималних пренапона на изолаторским ланцима 230 kV вода у функцији отпорности уземљења стубова и броја земљоводних ужади [72]

Земљоводним ужадима је могуће штитити и водове са хоризонталним распоредом фазних проводника као што су они на сликама 3.11 и 3.12 [72].

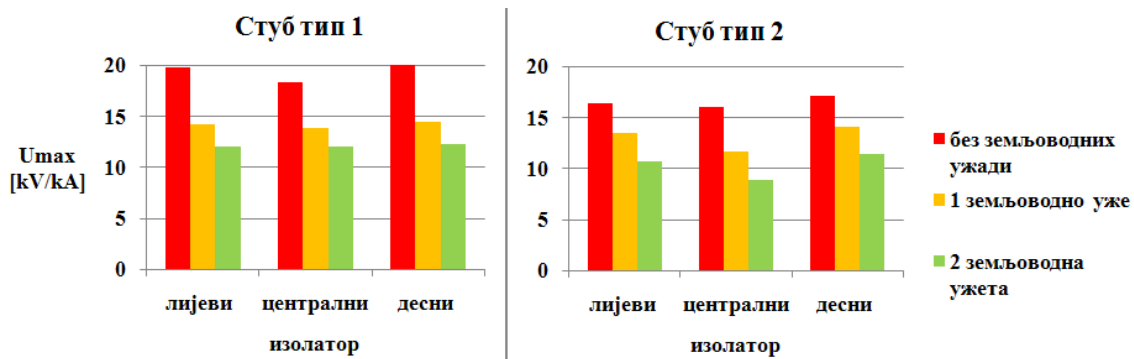


Слика 3.11 – Примјена земљоводних ужади за заштиту 230 kV надземног вода са стубовима типа мачка (тип 1), растојање d износи 5 m [72]



Слика 3.12 – Примјена земљоводних ужади за заштиту 230 kV надземног вода са стубовима типа Y (тип 2), растојање d износи 4 m [72]

Ефикасност примјене земљоводних ужади за случај атмосферског пражњења у десно заштитно уже је приказана на слици 3.13 [72]. Уградњом већег броја земљоводних ужади и у овом случају је постигнут бољи квалитет заштите.

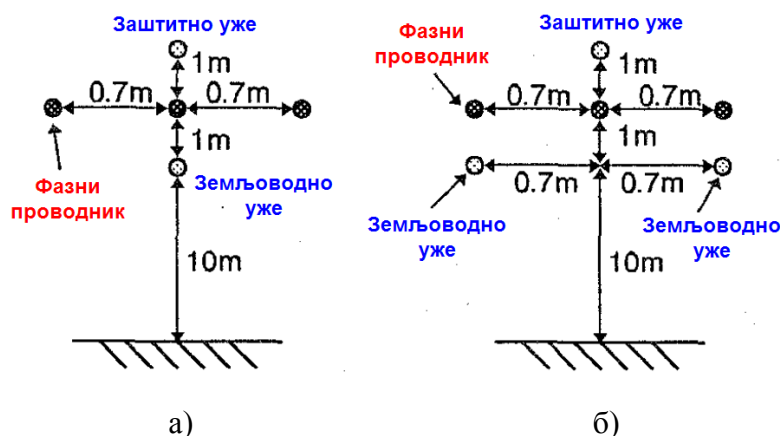


Слика 3.13 – Примјена земљоводних ужади за заштиту 230 kV надземних водова са стубовима приказаним на сликама 3.11 и 3.12 [72]

3.2.2. Земљоводна ужад на дистрибутивним водовима

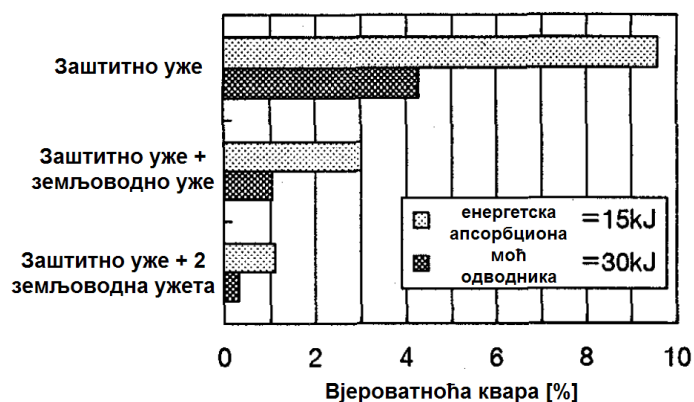
Земљоводна ужад се на дистрибутивним водовима углавном користе за смањење енергетског напрезања линијских одводника пренапона. У [109],[110] је показано да се уградњом заштитног ужета вјероватноћа термичког уништења линијских одводника пренапона смањује на испод 10%, а истовременим двоструким повећањем енергетске апсорбционе моћи линијских одводника на испод 5%. Ипак, позитивна атмосферска пражњења имају велике амплитуде струја и ослобађају велику енергију тако да ће она изазвати термичко уништење линијских одводника упркос наведеним мјерама заштите. Критични стубови дистрибутивног вода, на којима се упркос уградњи заштитног ужета дешавају термичка уништења линијских одводника пренапона, могу да се штите примјеном земљоводних ужади, слика 3.14 [110]. Заштитна улога земљоводних ужади се огледа у томе што она проводе дио струје атмосферског пражњења усљед чега се смањује амплитуда струје која се одводи кроз линијске одводнике пренапона. Самим тим се смањује и њихово енергетско напрезање.

Ова врста заштите је предложена за примјену на 6,6 kV водовима у Јапану на којима су линијски одводници пренапона били угрожени од зимских позитивних атмосферских пражњења. Да би земљоводна ужад на дистрибутивним водовима имала максималну ефикасност треба да се уграђују на 6 до 8 сусједних распона, а тачна вриједност зависи од отпорности уземљења стубова и интервала уградње линијских одводника пренапона [110].



Слика 3.14 – Примјена а) једног б) два земљоводна ужета за смањење енергетског напрезања линијских одводника пренапона на 6,6 kV водовима у Јапану [110]

Вјероватноћа термичког уништења линијских одводника пренапона у функцији њихове енергетске апсорбционе моћи и броја уграђених земљоводних ужади је приказана на слици 3.15 [110]. Уградњом земљоводног ужета апсорбована енергија линијских одводника пренапона је смањена за око 70%. Ово је осјетно бољи резултат у односу на смањење енергетског напрезања које је постигнуто примјеном одводника пренапона двоструко веће апсорбционе моћи и које износи око 60%. Инвестициони трошкови оба рјешења су једнаки, рачунато према цијенама из Јапана [110].



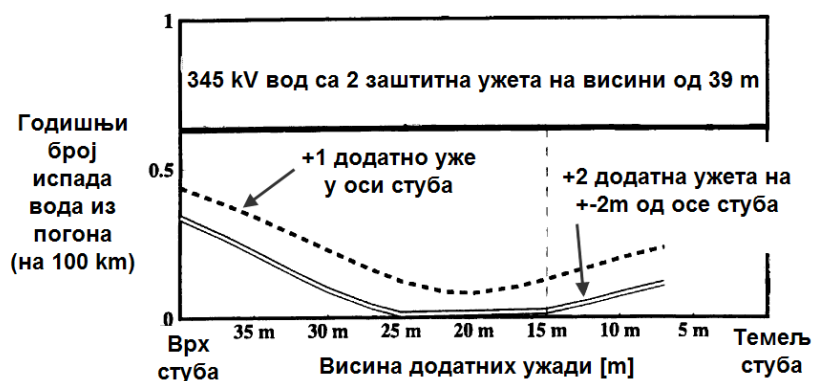
Слика 3.15 – Вјероватноћа квара 6,6 kV линијских одводника пренапона у функцији њихове енергетске апсорбционе моћи и броја земљоводних ужади [110]

3.2.3. Комбинована примјена заштитних и земљоводних ужади

Надземни водови се од атмосферских пренапона могу штитити комбинованом примјеном додатних заштитних ужади и земљоводних ужади. Ове двије врсте заштите се често истовремено анализирају како би се одредило да ли је ефикасније да се додатно уже постави испод или изнад фазних проводника. Заштитна улога обје врсте ужади се огледа у смањењу струје која се са уземљивача стуба одводи у тло (смањење напона конзоле стуба) и у повећању електромагнетне спреге између фазних проводника и ужади усљед чега се смањују максимални напони на изолаторским ланцима.

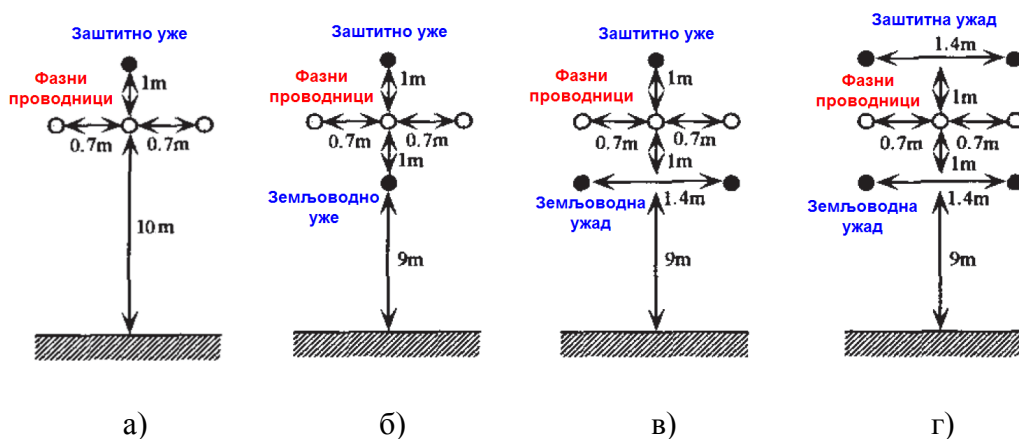
На слици 3.16 је приказан прорачунати годишњи број испада из погона 345 kV надземног вода са два заштитна ужета у функцији броја додатних ужади и позиције њихове уградње [22]. У овом случају је додатно уже ефикасније уградити као земљоводно него као треће заштитно уже. Разлог томе је двојак:

1. Три заштитна ужета се међусобно екранирају усљед чега се смањује њихово кумулативно заштитно дејство.
2. Електромагнетна спрега доњих фазних проводника је много јача са земљоводним ужадима него са заштитним ужадима због краћег растојања.



Слика 3.16 – Побољшање перформанси 345 kV надземног вода примјеном додатних ужади [22]

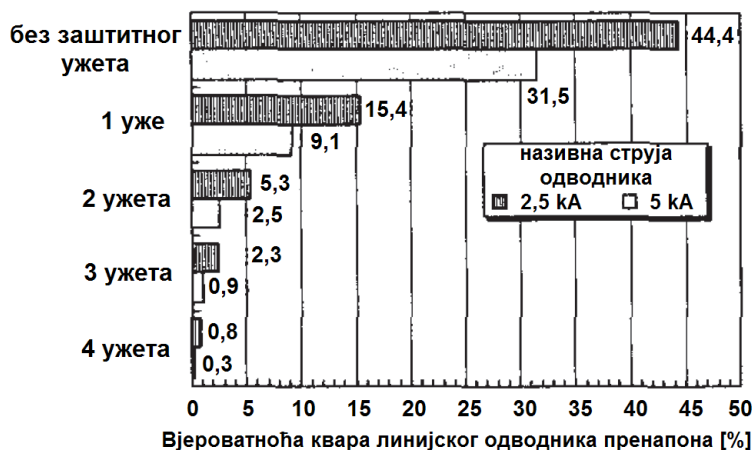
Поређење ефикасности уградње земљоводних ужади и додатних заштитних ужади са становишта смањења енергетског напрезања линијских одводника пренапона на дистрибутивним водовима је приказано у [130]. Оптималне конфигурације и оптималне позиције заштитних и земљоводних ужади на дистрибутивном воду су приказане на слици 3.17 [130].



Слика 3.17 – Оптималне позиције заштитних и земљоводних ужади на дистрибутивном воду а) једно уже б) два ужета в) три ужета г) четири ужета [130]

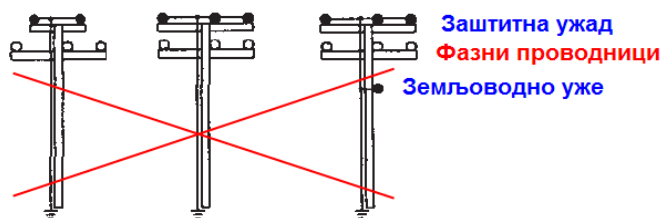
На слици 3.18 је приказан утицај броја заштитних и земљоводних ужади, као и утицај називне струје одвођења линијских одводника пренапона на вјероватноћу термичког уништења одводника за конфигурације ужади са слике 3.17 [130]. Уградња додатног ужада је знатно ефикаснији начин заштите линијских

одводника пренапона од двоструког повећања њихове енергетске апсорбционе моћи. За заштиту веома угрожених линијских одводника пренапона на дистрибутивним водовима предлаже се примјена два или три додатна ужета (једно заштитно и једно или два земљоводна ужета).



Слика 3.18 – Енергетско напрезање линијских одводника пренапона у зависности од броја додатних ужеди и енергетске апсорбционе моћи одводника [130]

Конфигурације заштитних и земљоводних ужеди које не треба да се примјењују због слабе ефикасности су приказане на слици 3.19 [130].

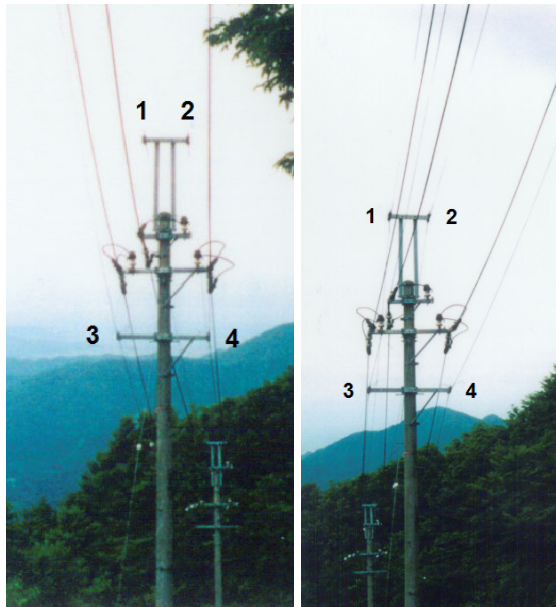


Слика 3.19 – Непожељне конфигурације заштитних и земљоводних ужеди на дистрибутивном воду [130]

Поред бољих заштитних карактеристика уградња земљоводних ужеди има следеће додатне предности у односу на уградњу другог заштитног ужета:

1. Механичко напрезање стубова и њихових темела је знатно мање због ниже тачке вјешања ужета. Ово је важно код стубова са мањом механичком издржљивошћу или у областима у којима постоје велика напрезања стубова усљед дјеловања вјетра, леда и слично.
2. Уградња земљоводног ужета је знатно једноставнија због ниже тачке вјешања, једноставнијег система вјешања и постављања ужеди испод фазних проводника.

На слици 3.20 је приказан примјер заштите дистрибутивног надземног вода у Јапану примјеном четири ужета, од којих су два заштитна (1 и 2), а два земљоводна (3 и 4) [59].



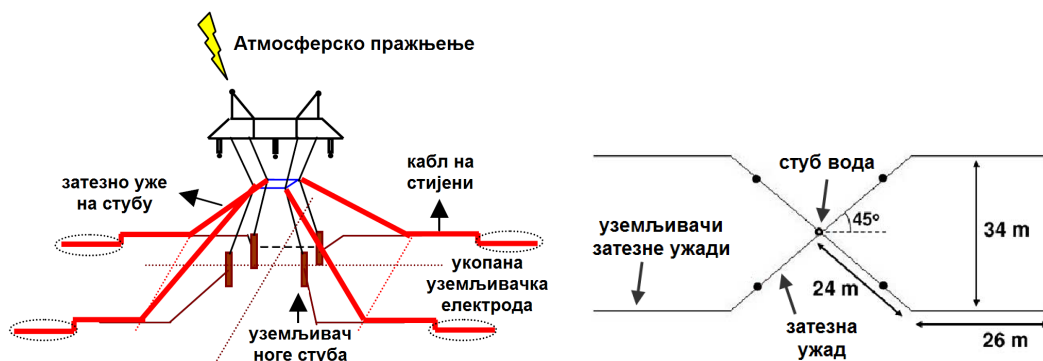
Слика 3.20 – Заштита дистрибутивног надземног вода у Јапану примјеном четири ужета, два заштитна (1 и 2) и два земљоводна (3 и 4) [59]

3.3. Затезна ужад

У поглављу 3.2.1 је анализиран систем заштите од атмосферских пренапона надземног 230 kV вода који се налази у Бразилу у области Амазона. Заштита критичних стубова и распона вода је реализована комбинованом примјеном земљоводних ужади (underbuilt wires) и затезних ужади на стубовима вода (guy wires). Заштита базирана на примјени линијских одводника пренапона није прихваћена због великих потешкоћа око њиховог одржавања у овим неприступачним предјелима, поготово у кишним периодима године.

Примјена затезних ужади на стубовима 230 kV вода је приказана на слици 3.21 а) [72],[126],[127]. У овом случају су кориштена четири затезна ужета постављана под углом од 90° , али је теоријски могуће да се користи и n ужади постављених под углом од $360^{\circ}/n$. Затезна ужад имају улогу да одведу дио струје атмосферског пражњења у тло и тако смање струју која се одводи кроз стуб вода и кроз његов уземљивач. На тај начин се значајно смањују пренапони на конзоли стуба што директно смањује вјероватноћу појаве испада вода из погона.

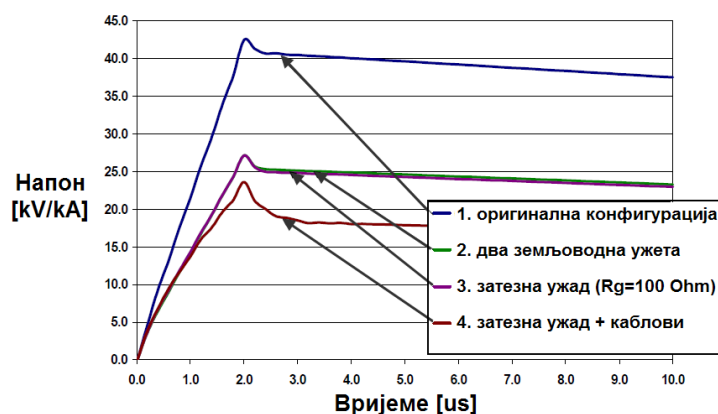
Дужина затезних ужади на слици 3.21 износи 24 m и она зависи од висине тачке фиксирања ужади на стубу и од мјеста анкерисања ужади поред стуба. Даље се на њих настављају или каблови који су положени преко стјеновитог терена и повезани на укопане уземљивачке електроде [127] или хоризонталне укопане уземљивачке електроде [72]. Које рјешење ће се примјенити зависи од карактеристика околног тла.



Слика 3.21 – Заштита надземног вода примјеном затезних ужади на његовим стубовима [72],[127]

Прорачун ефикасности затезних ужади је рађен за случај атмосферског пражњења са струјом троугаоног облика у врх стуба надземног вода [127]. Амплитуда струје пражњења је усвојена да буде 50 kA, а параметри таласа $2/70 \mu\text{s}/\mu\text{s}$. Отпорност уземљења стубова је усвојена да износи 100 Ω . Резултати прорачуна су приказани на слици 3.22 [127]. У случају када на воду није примјењена додатна заштита максимални пренапон износи 2,1 MV што је знатно више од подносивог напона изолације који је једнак 1,2 MV. Примјеном два земљоводна ужета максимални пренапон је значајно снижен и то на вриједност од око 1,35 MV. Исти пренапон се добија и примјеном четири затезна ужета са отпорношћу уземљења електрода од 400 Ω , односно еквивалентном отпорношћу уземљења сва четири ужета од 100 Ω . Примјеном четири затезна ужета повезана на дугачке каблове положене по површини тла напон је снижен на вриједност од 1,2 MV. Каблови који су положени по површини стијене имају повећан доземни капацитет који им смањује вриједност ионако мале карактеристичне импедансе. Негативни рефлектовани напонски таласи који се формирају у тачкама прелаза затезних ужади на каблове значајно смањују пренапоне на конзоли стуба. Да би примјена каблова била ефикасна они морају бити или довољно дуги или квалитетно уземљени како би се спријечило појављивање позитивних

рефлектованих напонских таласа са њиховог краја у времену док је напон на конзоли стуба још увијек висок.



Слика 3.22 – Максимални пренапон на изолаторским ланцима 230 kV вода у функцији примјењеног система заштите [127]

Резултати са слике 3.22 су добијени за случај када сваки уземљивач затезног ужа има отпорност уземљења од 400Ω . Прорачун је поновљен за случај када отпорност уземљења стубова вода износи 500Ω умјесто 100Ω . Отпорност уземљења затезне ужади је варирана како би се испитао њен утицај на висину максималних пренапона. Добијени резултати су приказани у табели 3.4 [127]. Напон на изолаторским ланцима вода је нижи од критичних $1,2 \text{ MV}$ када је отпорност уземљења појединачних затезних ужади једнака 150Ω , тј. када им је еквивалентна отпорност једнака $37,5 \Omega$.

Табела 3.4 – Утицај отпорности уземљења затезних ужади на висину пренапона на изолаторском ланцу 230 kV вода [127]

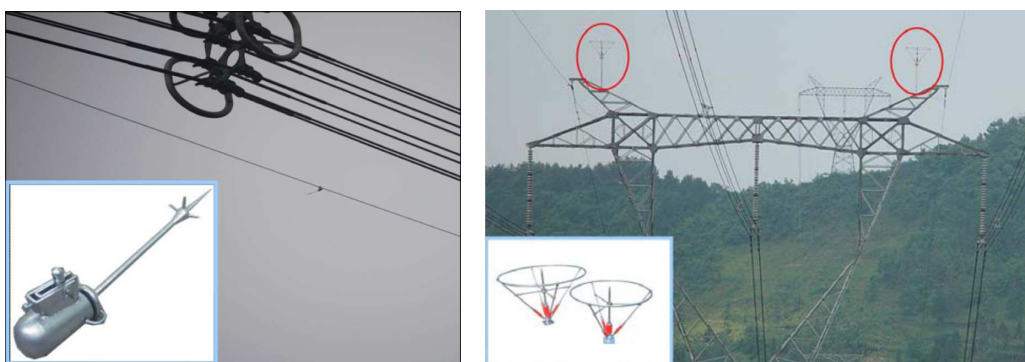
Конфигурација	Пренапон на изолаторском ланцу
Без затезних ужади ($R_s=500 \Omega$)	2225 kV
Затезна ужад ($R_1=R_2=R_3=R_4=200 \Omega$)	1280 kV
Затезна ужад ($R_1=R_2=R_3=R_4=150 \Omega$)	1180 kV
Затезна ужад ($R_1=R_2=R_3=R_4=100 \Omega$)	960 kV
Затезна ужад ($R_1=R_2=R_3=R_4=50 \Omega$)	870 kV

3.4. Заштита вода од директних пражњења у фазне проводнике

Основна улога заштитног ужа на надземном воду јесте да спријечи појаву директних атмосферских пражњења у фазне проводнике вода, јер оваква

празњења практично увијек изазивају испад вода из погона. Упркос пажљивом пројектовању позиције заштитних ужади у односу на фазне проводнике, у појединим случајевима се добија неприхватљиво ниска ефикасност заштите.

У [131] су анализирани испади из погона 500 kV надземних водова у Кини који су узроковани атмосферским празњењима у фазне проводнике, а мимо заштитних ужади (shielding failures). Анализирани 500 kV водови повезују највећу хидроелектрану на свијету Три клисуре (Three Gorges) са остатком ЕЕС-а државе. У периоду од 2002. до 2009. године догодила су се 23 испада ових водова из погона, а 21 или 91,3% њих је узрокован директним празњењима у фазне проводнике [131]. Како би се ријешили наведени проблеми примјењени су линијски одводници пренапона, иглице за заштитно уже (side needles) и громобранске хватаљке са контролисаним празњењем (controllable discharging lightning rod). Иглице за заштитно уже су приказане на слици 3.23 а) [131], а громобранске хватаљке са контролисаним празњењем на слици 3.23 б) [131]. Након увођења поменутих система заштите број испада водова из погона узрокованих директним празњењима у фазне проводнике је у 2010. години опао за 44,45%, иако је грмљавинска активност порасла 1,43 пута. У периоду јануар-август 2011. године није детектован ниједан испад вода из погона узрокован атмосферским пренапонима. На шест распона вода који су штићени заштитним иглицама регистрована су директна празњења у фазне проводнике што показује да овај систем заштите нема одговарајућу поузданост.



а)

б)

Слика 3.23 – а) Иглица за заштитно уже и б) громобранске хватаљке са контролисаним празњење постављене на врху стуба 500 kV вода [131]

3.5. Ефикасност и ограничења специјалних система заштите

Специјални системи заштите надземних водова се користе у случајевима када изграђени водови, упркос примјени стандардних система заштите, имају неприхватљиво велики број испада из погона узрокованих атмосферским пренапонима. Од свих специјалних система заштите надземних водова најчешће се користе линијски одводници пренапона. Њиховом уградњом могуће је значајно побољшати перформансе критичних водова свих напонских нивоа. Ипак, у специфичним случајевима они показују недостатке који смањују техничко-економску оправданост њихове примјене. На водовима без заштитног ужета линијски одводници пренапона апсорбују изузетно велику енергију приликом појаве директних атмосферских пражњења у вод па би њихова уградња требало да се комбинује са уградњом заштитних ужади. На најкритичнијим дистрибутивним водовима треба истовремено да се примјењују заштитна и земљоводна ужад како би се апсорбована енергија линијских одводника свела на прихватљив ниво. Линијски одводници пренапона захтјевају редовно одржавање тако да нису погодни за уградњу на водове који пролазе кроз неприступачна подручја (нпр. прашумске области, неприступачне планинске области и слично). У таквим случајевима преносни водови се могу штитити комбинованом примјеном заштитних, земљоводних и затезних ужади.

На преносним водовима највиших називних напона испале из погона узрокују атмосферска пражњења која се одвијају у фазне проводнике вода, а мимо заштитних ужади. Ова врста проблема се јавља у случајевима када заштитно уже недовољно ефикасно екранира фазне проводнике вода. Разлог томе може бити или да заштитни угао на воду није добро пројектован или да је заштитни угао добро пројектован али се због специфичности трасе вода он квари. Други сценарио се може срести на затезним стубовима на којима се има велики угао скретања трасе, затим у случају постојања великог угиба фазних проводника у односу на заштитну ужад који се има на дугим распонима вода, у случају градње вода по врховима високих планина и слично. У овим случајевима проблем испада вода из погона се може ријешити примјеном линијских одводника пренапона. Примјена нестандартних система заштите у овом случају није препоручљива јер њихова ефикасност није доказана.

4. Моделовање надземног вода у прорачунима атмосферских пренапона

Са развојем модерних рачунара развијени су и први програмски пакети за нумеричко моделовање атмосферских пренапона на надземним водовима. Данас је на располагању велики број таквих програмских пакета, а неки од њих су Гром [132],[133], SIGMA SLP [134], FLASH [22][34], НЕМ [129], ЕМТР-RV [135], ЕМТР-АТР [136]-[138] итд. Сви прорачуни у овом раду су рађени у програмском пакету ЕМТР-АТР због тога што је овај програмски пакет међународно познат и признат, што се нови модели елемената и нови системи заштите релативно једноставно могу имплементирати у прорачун и што је програм бесплатан за некомерцијалну примјену. Програмски пакет ЕМТР-АТР је један од најпознатијих и најчешће коришћених програмских пакета за прорачуне атмосферских пренапона на надземним водовима. Програм је настао 1984. године на основу базног програма ЕМТР који је написан у програмском језику Фортран и који се појавио 1975. године. Аутори програма ЕМТР су Херман Домел (Hermann Dommel) и Скот Мејер (Scott Meyer). Постојала је могућност да се прорачуни раде и у програмском пакету Гром који има интегрисан статистички прорачун годишњег броја испада вода из погона. Ипак, то није урађено првенствено због тога што у програмском пакету Гром није могуће реализовати и интегрисати у прорачун нове моделе елемената и нове системе заштите без да се програм значајно модификује.

Приликом прорачуна амплитуде атмосферских пренапона на надземним водовима и броја испада вода из погона који су узроковани овим пренапонима могуће је користити двије основне врсте прорачуна, класични и статистички. Статистички прорачун има двије основне предности у односу на класични начин прорачуна. Прва предност је та што се резултати приказују у форми која је корисницима блиска, тј. као резултат се добија годишњи број испада из погона вода дужине 100 km. Друга битна предност је што се у статистичком прорачуну у обзир могу узети утицаји различитих случајних параметара везаних за појаву атмосферских пражњења као што су мјесто пражњења, електрични параметри пражњења (амплитуда струје, стрмина чела, вријеме зачеља итд) и слично.

Постоје различите врсте статистичних прорачуна, а данас се најчешће користи Монте Карло прорачун [139]. У програмском пакету Гром се у статистичком прорачуну користи метода опасних параметара [140]. Недостатак статистичког прорачуна је што дуго траје па се у циљу смањења његовог трајања многи статистички параметри пражњења морају фиксирати, тј. мора се претпоставити да имају константну вриједност. Други, много озбиљнији проблем, је чињеница да електрични параметри пражњења (амплитуда струје, стрмина чела, трајање зачеља и слично) имају велика одступања у различитим географским областима. У прорачунима се обично усваја да је средња вриједност струје атмосферског пражњења око 30 kA (31 kA према [45]), док се према незваничним подацима са система SCALAR [28] на нашим просторима та вриједност креће око 20 kA па чак и ниже. Сљедећи битан недостатак статистичког прорачуна је што се вјероватноћа појаве квара рачуна за свега неколико распона вода, а усваја се да је та вјероватноћа једнака дуж цијеле трасе вода што није тачно. Такође, познато је да параметри вода као што су отпорност уземљења стубова, дужина распона, специфична електрична отпорност тла итд. знатно варирају од стуба до стуба и на различитим дијеловима трасе. Ти подаци се у статистичком прорачуну не могу узети у обзир без да се прорачун знатно закомпликује и продужи. Такође, очекивани број пражњења у вод се рачуна за константну висину стуба и за константу површинску густину пражњења дуж цијеле трасе вода. На тај начин се занемарује чињеница да стубови постављени на врху брда имају много већу атрактивну површину од оних постављених у долинама, али се занемарује и чињеница да дуж трасе вода постоје области са веома слабом, али исто тако и са веома интензивном грмљавинском активношћу. Због свега претходно наведеног веома често се прорачуни угрожености водова од атмосферских пренапона врше примјеном класичног прорачуна.

Класични, детерминистички, начин прорачуна угрожености водова од атмосферских пренапона се ради са фиксним параметрима атмосферског пражњења и за фиксно мјесто пражњења на воду. Најчешће се анализира најкритичнији сценарио, тј. прорачун се ради за случај атмосферског пражњења у врх неког од стубова на критичном дијелу трасе вода на коме треба да се пројектује додатна заштита. Усвајају се фиксни параметри атмосферског

пражњења (вријеме чела и зачеља таласа) и одређује се амплитуда струје атмосферског пражњења при којој ће се десити прескок на воду [103],[141]. Неки аутори одређују максималне пренапоне на воду који се јављају приликом дјеловања атмосферских пражњења са различитим амплитудама струја [72],[127]. Примјена класичног прорачуна је оправдана због чињенице да практично сваки угрожен вод има критичне дијелове трасе и заштита се реализује управо на тим распонима. Поједини аутори веома често у својим радовима публикованим у врхунским међународним научним часописима усвајају да је вјероватноћа појаве квара на воду једнака вјероватноћи појаве струје која изазива испад вода из погона и која је одређена примјеном класичног начина прорачуна [142]. Класични прорачун се, у складу са ИЕС 62305-1 [43], користи и приликом пројектовања заштите постројења од атмосферских пренапона. Предност овог начина прорачуна је и што знатно краће траје, а за његову примјену није потребно развијати сложене статистичке методе прорачуна.

У овом поглављу су анализирани модели елемената који се користе приликом прорачуна атмосферских пренапона на надземним водовима и који су предложени у међународним стандардима који се баве овом проблематиком [34],[45],[55],[143]-[147]. Циљ је да се одреде оптимални модели елемената и оптималне еквивалентне шеме за прорачуне, како би добијени резултати имали што је могуће већу тачност. Проблем избора оптималних модела елемената за прорачуне атмосферских пренапона на надземним водовима је у томе што се за сваки елемент нуди више различитих модела, без јасног коментара у вези са предностима, недостацима и тачношћу појединих модела. Избор оптималних модела елемената ће се радити по критеријуму да је најсложенији модел елемента уједно и најтачнији, а оптималан модел елемента је онај који је најједноставнији за кориштење и који истовремено има минимално одступање резултата прорачуна у односу на најтачнији модел.

Да би се радило поређење различитих модела елемента усвојени су улазни подаци који су у свим прорачунима били константни. Основни модели и параметри елемената који су кориштени у прорачунима су приказани у табели 4.1 и углавном су преузети из [141]. Усвојени су једноставни модели и типичне вриједности параметара елемената. У прорачунима су варирани модели само

једног елемента како би се анализирао њихов утицај на добијене резултате [141]. Систем је моделован једнофазном замјенском шемом што је стандардни приступ код ове врсте прорачуна [23],[132],[133],[140],[141],[148]. Трофазне замјенске шеме вода се користе у случајевима када се одређује број једнофазних и вишефазних кварова, или у случајевима када се жели анализирати вод штићен линијским одводницима пренапона.

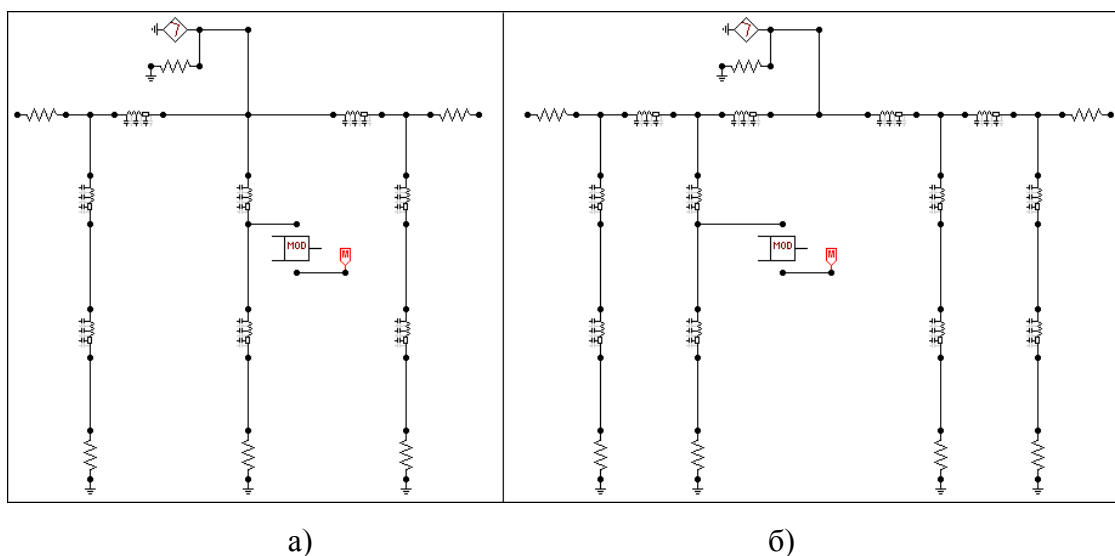
Табела 4.1 – Основни модели и параметри елемената за прорачуне

Модели елемената	
Елемент	Модел
Таласни облик струје пражњења	Троугаони, 10/350 $\mu\text{s}/\mu\text{s}$ [43]
Модел стуба вода	IEEE модел, израз (4.15)
Модел уземљивача стуба	Константна отпорност
Модел прескока на ваздушној изолацији	V-t крива
Параметри елемената	
Елемент	Вриједност
Број заштитних ужади и фазних проводника у снопу	1
Међуелектродно растојање изолаторског ланца за 400 kV вод	2,5 m
Међуелектродно растојање изолаторског ланца за 220 kV вод	1,6 m
Међуелектродно растојање изолаторског ланца за 110 kV вод	0,96 m
Висина стуба и заштитног ужета	25 m
Висина фазног проводника	16 m
Отпорност уземљења стуба	15 Ω
Карактеристична импеданса стуба	148 Ω
Брзина простирања таласа кроз стуб	255 m/ μs
Карактеристична импеданса фазног проводника [Ω]	450
Карактеристична импеданса заштитног ужета [Ω]	550
Карактеристична импеданса канала грома [Ω]	400
Дужина распона [m]	200

Различите анализе о утицају модела елемената на резултате прорачуна угрожености преносних водова од атмосферских пренапона се могу наћи у [141],[149],[150]. У [149],[150] су углавном рачунати максимални пренапони на

конзоли стуба и у тачки пражњења на воду, као и вријеме достизања максималних вриједности напона, за фиксне вриједности струја пражњења. Показано је да различити модели елемената имају веома изражен утицај на добијене резултате. У [141] је анализиран утицај модела елемената на минималну амплитуду струје атмосферског пражњења која је довољна да изазове испад вода из погона. Исти начин прорачуна је кориштен и у овом поглављу. Најкритичнији резултати су добијени у случају када се прескок на изолаторским ланцима моделује примјеном V-t криве изолације. У случају примјене других модела прескока појединачни утицај модела елемената на резултате прорачуна је знатно слабије изражен.

Оптималне еквивалентне шеме вода за случај атмосферског пражњења у врх стуба и у средину распона вода су приказане на слици 4.1 [141],[149]. Шеме су креиране у програмском пакету ЕМТР-АТР примјеном модела елемената из табеле 4.1 и кориштене су у свим прорачунима у овом поглављу. На два крајња стуба су постављене завршне импедансе којима се моделују остали распони вода и чијом примјеном се спречава појава непостојећих рефлектованих напонских и струјних таласа.



Слика 4.1 - Оптимална замјенска шема вода за случај атмосферског пражњења у а) врх стуба и у б) средини распона вода

4.1. Модел атмосферског пражњења

4.1.1. Модел канала атмосферског пражњења

Атмосферско пражњење се у овој врсти прорачуна практично увијек моделује као реални струјни извор који се састоји од идеалног струјног извора у паралели са карактеристичном импедансом канала атмосферског пражњења [34],[45],[141],[145]-[147]. У [144] вриједност карактеристичне импедансе канала атмосферског пражњења није дефинисана што значи да се предлаже коришћење идеалног струјног извора, тј. бесконачне вриједности карактеристичне импедансе.

На основу резултата експерименталних мјерења карактеристичне импедансе канала атмосферског пражњења проведених на Останкино торњу у Москви закључено је да ова импеданса има коначну вриједност и то у опсегу од 600 Ω до 2500 Ω [151]. У [147],[152] се предлаже вриједност од 1000 Ω . Према [110],[145],[153],[154] карактеристична импеданса канала атмосферског пражњења износи 400 Ω . Мања вриједност карактеристичне импедансе одговара пражњењу са већом амплитудом струје. Утицај вриједности карактеристичне импедансе канала атмосферског пражњења на таласне облике пренапона на воду је анализиран у [149],[150]. Показано је да са порастом вриједности карактеристичне импедансе пренапони у систему израженије осцилују усљед чега долази до благог пораста њихове амплитуде.

Минималне амплитуде струја атмосферског пражњења које изазивају појаву повратног прескока на воду у функцији вриједности карактеристичне импедансе канала атмосферског пражњења су приказане у табели 4.2 [141]. Усвојене су три вриједности карактеристичне импедансе, и то 400 Ω , 1000 Ω и бесконачна вриједност. Минимална струја атмосферског пражњења, потребна да изазове повратни прескок на воду, благо опада са порастом вриједности карактеристичне импедансе канала пражњења. То се дешава јер се са порастом вриједности карактеристичне импедансе већи дио струје пражњења затвара преко вода у тло усљед чега се у систему појављују и виши пренапони. За инжењерске прорачуне се може усвојити бесконачна вриједност карактеристичне импедансе јер је то најједноставније, а добијају се најкритичнији резултати. Ако се канал пражњења жели тачније моделовати може се усвојити коначна вриједност импедансе у вриједности од 400 Ω или 1000 Ω .

Табела 4.2 – Утицај вриједности карактеристичне импедансе канала атмосферског пражњења на амплитуду струје пражњења довољну да изазове повратни прескок на воду

Мјесто пражњења	Вриједност карактеристичне импеданса	Амплитуда струје пражњења која узрокује повратни прескок		
		110 kV	220 kV	400 kV
Напонски ниво		110 kV	220 kV	400 kV
Распон	400 Ω	79 kA	131 kA	204 kA
	1000 Ω	77 kA	128 kA	200 kA
	бесконачна	75 kA	125 kA	195 kA
Врх стуба	400 Ω	48 kA	79 kA	124 kA
	1000 Ω	47 kA	78 kA	122 kA
	бесконачна	47 kA	77 kA	121 kA

4.1.2. Таласни облик струје атмосферског пражњења

Таласни облик струје атмосферског пражњења се може моделовати примјеном великог броја различитих модела. У међународним техничким документима и научним радовима најчешће се срећу следећа три модела: троугаони таласни облик [144], Хајдлеров (Heidler) извор [155] и CIGRE модел [145]. Троугаони таласни облик струје и CIGRE модел су прихваћени и у [34].

Математички израз којим се дефинише троугаони таласни облик струје атмосферског пражњења је (4.1):

$$I = S_1 \cdot t \cdot h(t) - S \cdot (t - T_C) \cdot h(t - T_C) + (S_2 - S_1) \cdot (t - 2 \cdot T_Z) \cdot h(t - 2 \cdot T_Z) \quad (4.1)$$

гдје су: t - вријеме [μs],

T_C - вријеме трајања чела таласа [μs],

T_Z - вријеме трајања зачеља таласа [μs],

S_1 и S_2 - стрмине чела и зачеља таласа [$\text{kA}/\mu\text{s}$], дефинисане су изразом (4.2):

$$S_1 = \frac{I_M}{T_C} \quad \text{и} \quad S_2 = \frac{I_M}{2 \cdot T_Z} + S_1 \quad (4.2)$$

гдје је: I_M - амплитуда струје атмосферског пражњења [kA].

Троугаони модел таласног облика струје атмосферског пражњења је интегрисан у програмски пакет ЕМТР-АТР под називом Slope-Ramp Type 13.

Хајдлеров модел струје атмосферског пражњења се често користи у прорачунима јер моделује конкавни дио чела струје атмосферског пражњења па самим има боље подударање са реалним таласним обликом. Овај модел је сложенији за примјену од троугаоног таласа јер има компликовану процедуру прорачуна параметара за различите таласне облике струје пражњења [156]. Хајдлеров модел таласног облика струје атмосферског пражњења је, у програмском пакету ЕМТР-АТР, математички дефинисан преко израза (4.3):

$$I = I_M \cdot \frac{\left(\frac{t}{\tau_1}\right)^n}{1 + \left(\frac{t}{\tau_1}\right)^n} \cdot e^{-\frac{t}{\tau_2}} \quad (4.3)$$

гдје су: I_M - амплитуда струје пражњења [кА],

n - емпиријски коефицијент, усвојена је вриједност 3,

t - вријеме [μs],

τ_1 - временска константа чела [μs], 19 μs за талас облика 10/350 $\mu\text{s}/\mu\text{s}$,

τ_2 - временска константа зачеља [μs], 485 μs за талас облика 10/350 $\mu\text{s}/\mu\text{s}$.

Предложена вриједност коефицијента n према [157] износи 10, док се у програму ЕМТР-АТР предлаже вриједност 2. На основу анализа приказаних у [149],[150] предложена је вриједност коефицијента n једнако 3. Хајдлеров модел таласног облика струје атмосферског пражњења је интегрисан у програмски пакет ЕМТР-АТР под називом Heidler Type 15, а његов математички израз се незнатно разликује од оригиналног [155]. Наиме, у моделу који је реализован у програмском пакету ЕМТР-АТР не постоји корекциони фактор тјемене вриједности струје јер се његова вриједност аутоматски одређује.

Математички израз који описује CIGRE модел струје атмосферског пражњења је доста сложен јер су чело и зачеље таласа дефинисани са двије различите функције. Предност овог модела је што највјерније репрезентује реални таласни облик струје пражњења, али је недостатак то што му је математичка дефиниција доста сложена. Чело струјног таласа се описује преко израза (4.4) [145]:

$$I = A \cdot t + B \cdot t^n \quad (4.4)$$

гдје су: t - вријеме [μs],

A и B - константе чије вриједности се рачунају из израза (4.5):

$$A = \frac{1}{n-1} \left(0,9 \cdot \frac{I}{t_n} \cdot n - S_m \right) \quad \text{и} \quad B = \frac{1}{t_n^n \cdot (n-1)} (S_m \cdot t_n - 0,9 \cdot I) \quad (4.5)$$

n и t_n - константе чије вриједности се рачунају из израза (4.6):

$$n = 1 + 2 \cdot (S_N - 1) \cdot \left(2 + \frac{1}{S_N} \right) \quad \text{и} \quad t_n = 0,6 \cdot t_f \cdot \frac{3 \cdot S_N^2}{1 + S_N^2} \quad (4.6)$$

S_N - константа чија вриједност се рачуна из израза (4.7):

$$S_N = \frac{S_m \cdot t_f}{I} \quad (4.7)$$

I - амплитуда струје пражњења [kA],

S_m - максимална стрмина чела струје [kA/μs],

t_f - вријеме чела [μs].

Зачеље таласа се описује преко израза (4.8) [145]:

$$I = I_1 \cdot e^{-\frac{(t-t_n)}{t_1}} - I_2 \cdot e^{-\frac{(t-t_n)}{t_2}} \quad (4.8)$$

гдје је: t_n - константа [μs] одређена изразом (4.6),

t_1 и t_2 - константе које се рачунају из израза (4.9):

$$t_1 = \frac{t_h - t_n}{\ln 2} \quad \text{и} \quad t_2 = \frac{0,1 \cdot I}{S_m} \quad (4.9)$$

t_h - вријеме зачеља таласа [μs],

I_1 и I_2 - константе које се рачунају из израза (4.10):

$$I_1 = \frac{t_1 \cdot t_2}{t_1 - t_2} \cdot \left(S_m + 0,9 \cdot \frac{I}{t_2} \right) \quad \text{и} \quad I_2 = \frac{t_1 \cdot t_2}{t_1 - t_2} \cdot \left(S_m + 0,9 \cdot \frac{I}{t_1} \right) \quad (4.10)$$

CIGRE модел таласног облика струје атмосферског пражњења је интегрисан у програмски пакет EMTP-ATP под називом Cigré Type 15. Показује се да максимална стрмина чела струје (S_m) има веома изражен утицај на добијене резултате. На бази великог броја прорачуна закључено је да вриједност константе S_m треба бити два пута већа од стрмине таласа линеарно растућег чела [141]. Смањењем вриједности константе S_m конкавни дио чела струјног таласа постаје слабо уочљив, док се њеним повећањем добијају знатно критичнији резултати у односу на друга два модела. Детаљне анализе утицаја различитих модела таласних облика струја атмосферских пражњења на таласне облике и амплитуде пренапона на воду се могу наћи у [149],[150],[158]. Показано је да различити

моделу струја атмосферских пражњења имају веома изражен утицај на таласни облик и амплитуду пренапона на воду.

Минималне прорачунате амплитуде струја атмосферских пражњења које изазивају појаву прескока на воду за различита мјеста атмосферског пражњења су приказане у табели 4.3. Уочавају се значајна одступања добијених резултата. Cigre модел даје најкритичније резултате, али се показује да није погодан за кориштење због осцилација добијених резултата које ће бити описане у даљем тексту. Хајдлеров извор даје најмање критичне резултате, а недостатак му је и сложена процедура прорачуна параметара за различите таласне облике струја пражњења. Троугаони талас је погодан за инжењерске прорачуне због једноставног прорачуна његових параметара и доста доброг слагања добијених резултата са другим моделима. Због тога се може сматрати оптималним рјешењем између три анализирана.

Табела 4.3 – Утицај модела таласног облика струје атмосферског пражњења на амплитуду струје пражњења довољну да изазове повратни прескок на воду

Мјесто пражњења	Модел струје пражњења	Амплитуда струје пражњења која узрокује повратни прескок		
		110 kV	220 kV	400 kV
Напонски ниво		110 kV	220 kV	400 kV
Распон	Троугаони	79 kA	131 kA	204 kA
	Хајдлер	89 kA	148 kA	232 kA
	Cigre ^{1*}	44 (86) kA	80 (142) kA	153 (222) kA
Врх стуба	Троугаони	48 kA	79 kA	124 kA
	Хајдлер	55 kA	92 kA	144 kA
	Cigre ^{2*}	40 (52) kA	48 (87) kA	80 (135) kA

^{1*} – Прорачунате струје у случају пражњења у распон вода износе:

1. За 110 kV систем минимална струја која изазива прескок на воду износи 44 kA, али се прескок устали превазилажењем струје од 86 kA.
2. За 220 kV систем минимална струја која изазива прескок на воду износи 80 kA, али се прескок устали превазилажењем струје од 142 kA.
3. За 400 kV систем минимална струја која изазива прескок на воду износи 153 kA, али се прескок устали превазилажењем струје од 222 kA.

^{2*} - Прорачунате струје у случају пражњења у врх стуба износе:

1. За 110 kV систем минимална струја која изазива прескок на воду износи 40 kA, али се прескок устали превазилажењем струје од 52 kA.
2. За 220 kV систем минимална струја која изазива прескок на воду износи 48 kA, али се прескок устали превазилажењем струје од 87 kA.
3. За 400 kV систем минимална струја која изазива прескок на воду износи 80 kA, али се прескок устали превазилажењем струје од 135 kA.

У случају примјене Сигре модела струје пражњења примјеђено је да се прескок при одређеним струјама пражњења дешава, док се при већим струјама пражњења не дешава. Тек након превазилажења критичне вриједности струје прескок би се усталио. Објашњење ове појаве је сљедеће: Код Сигре таласног облика струје атмосферског пражњења са повећањем амплитуде струје долази до израженог повећања и максималне стрмине на челу таласа. Познато је да ваздушна изолација боље подноси стрмије пренапонске таласе што се једноставно уочава и на основу изгледа V-t криве изолације. Због тога, упркос повећању амплитуде струје пражњења, због пораста стрмине таласа не долази до појаве прескока. Други разлог овој појави је тај што се са промјеном амплитуде и стрмине струјног таласа промјени и таласни облик пренапона на изолатору што утиче на резултате прорачуна. Исти проблеми са Сигре таласним обликом струје пражњења су уочени и приликом кориштења других модела прескока.

4.2. Модел ужата и фазних проводника

Основни модел ужата (заштитног и фазног проводника) је предложен давне 1931. године [159]. Овај модел се веома често користи и данас, поготово у случајевима када се прорачуни раде кориштењем једнофазне еквивалентне шеме вода. Карактеристична импеданса ужата се према овом моделу рачуна из израза (4.11), а брзина простирања таласа је једнака брзини свјетлости. Израз (4.11) важи за праволинијски проводник полупречника r који је постављен хоризонтално изнад тла на висини h .

$$Z_c = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \ln\left(\frac{2 \cdot h}{r}\right) = 60 \cdot \ln\left(\frac{2 \cdot h}{r}\right) \quad (4.11)$$

гдје су: r - полупречник ужата [m],

h - ефективна висина ужата [m], која се рачуна из израза (4.12):

$$h = H - \frac{2}{3} f \quad (4.12)$$

гдје су: H - висина ужета у тачки вјешања [m],

s - максимални угиб ужета у распону [m].

Ако се користе два фазна проводника у снопу (нпр. 400 kV вод) мора се рачунати еквивалентни полупречник ужета кориштењем израза (4.13):

$$r_e = \sqrt{r \cdot d} \quad (4.13)$$

гдје су: r - полупречник једног ужета [m],

d - растојање проводника у снопу [m].

Земљоводна ужад се моделују на исти начин као и заштитна ужад, израз (4.11).

Карактеристичне импедансе ужади се у програмском пакету ЕМТР-АТР моделују као дистрибуирани, транспоновани и једнофазни водови (Clarke).

Карактеристична импеданса затезних ужади се може рачунати из израза (4.14) [160] који важи за вертикалне праволинијске проводнике изнад тла. Брзина простирања таласа по ужету је једнака брзини свјетлости.

$$Z_c = 60 \cdot \ln \left(\frac{h}{e \cdot r} \right) \quad (4.14)$$

гдје су: h - дужина ужета [m],

r - полупречник ужета [m],

e - база природног алгоритма ($e \approx 2.71828$).

Карактеристична импеданса затезних ужади је мања од карактеристичне импедансе заштитних ужади.

Приликом простирања пренапонских таласа на ужадима може се десити да амплитуда пренапона превазиђе критичну вриједност електричног поља за ваздух. У том случају се јавља јонизација ваздуха у околини ужета, тј. појављује се импулсна корона. Импулсна корона узрокује деформацију пренапонских таласа, која се манифестује кроз смањење стрмине таласа, а самим тим и његове амплитуде [161],[162]. Детаљна анализа утицаја короне на простирање пренапонских таласа, као и начини њеног моделовања, су приказани у [150]. Корона се у програмском пакету ЕМТР-АТР не може моделовати на једноставан и ефикасан начин [163]. Због тога се практично увијек занемарује. Овакав приступ је оправдан чињеницом да корона нема изражен утицај на резултате прорачуна, а

с обзиром да смањује стрмину и амплитуду пренапонских таласа њеним занемаривањем се добијају незнатно критичнији резултати.

Радни напон на фазним проводницима вода се у прорачунима често занемарује јер није позната његова вриједност у тренутку пражњења [74],[141],[148]. У супротном, радни напон се у програмском пакету ЕМТР-АТР може моделовати примјеном извора простопериодичног напона фреквенције 50 Hz који је реализован у компоненти AC source. У статистичком прорачуну вриједност радног напона се може систематски варирати [34], док се у класичном прорачуну обично усваја најкритичнија вриједност. То значи да се усваја максимална вриједност радног напона која је по знаку супротна атмосферском пренапону.

Претходно наведени модели ужади су једноставни за употребу и често се користе у инжењерској пракси [141], а примјењени су и у програмском пакету Гром [132],[133]. Њихова основна предност је што на једноставан начин и са минималним бројем улазних података моделују ужад вода. Основни недостатак је што се занемарује фреквенцијска зависност електричних параметара вода. За тачније прорачуне параметара ужади вода треба се користити фреквенцијски зависан модел надземног вода који је интегрисан у програмски пакет ЕМТР-АТР као подпрограм под називом LCC. У њему се нуде различити начини прорачуна фреквенцијски зависних параметара вода. У овом раду је примјењен JMarti модел [164] који је предложен и у [34],[146],[147],[165]. Овај модел прорачунава параметре вода у временском домену, а уважава и појаву скин ефекта на ужадима приликом простирања високофреквентних таласа, као и електромагнетну спрегу између фазних и заштитних ужади и слично.

У табели 4.4 је приказан утицај модела ужади вода и радног напона система на резултате прорачуна. Са $Z_{c,v}$ је означен стандардни начин моделовања ужади и распона вода и који се базира на примјени израза (4.11). Са LCC је означен JMarti фреквенцијски зависан модел вода. LCC модел вода је преузет из примјера Exa_9 који је саставни дио ЕМТР-АТР програма. Усвојени су постојећи улазни подаци, уз корекције да фазни проводници нису у снопу (Auto bundling је искључено), а максимална фреквенција за прорачун параметара вода је повећана са 50 kHz на 500 kHz како је предложено у [146],[165]. Радни напон на фазном проводнику (U_r) је моделован преко идеалног трофазног простопериодичног напонског извора.

Табела 4.4 – Утицај модела ужади вода на амплитуду струје пражњења довољну да изазове повратни прескок на воду

Мјесто пражњења	Модел вода	Амплитуда струје пражњења која узрокује повратни прескок		
Напонски ниво		110 kV ($U_{\max}=90$ kV)	220 kV ($U_{\max}=180$ kV)	400 kV ($U_{\max}=327$ kV)
Распон	$Z_{c,v} (U_r=0)$	79 kA	131 kA	204 kA
	$Z_{c,v} (U_r=U_{\max})$	64 kA	102 kA	152 kA
	LCC ($U_r=0$)	93 kA	154 kA	241 kA
	LCC ($U_r=U_{\max}$)	76 kA	121 kA	180 kA
Врх стуба	$Z_{c,v} (U_r=0)$	48 kA	79 kA	124 kA
	$Z_{c,v} (U_r=U_{\max})$	39 kA	62 kA	93 kA
	LCC ($U_r=0$)	56 kA	94 kA	146 kA
	LCC ($U_r=U_{\max}$)	46 kA	74 kA	110 kA

Вриједност фазног радног напона (U_r) има велики утицај на резултате прорачуна, табела 4.4. Утицај је поготово изражен јер је анализиран најкритичнији случај. Употребом LCC модела се добијају веће минималне струје квара (мање критични резултати) зато што индуковани напони на фазним проводницима имају исти знак као атмосферски пренапон. Због тога долази до смањења висине пренапона на изолаторском ланцу. Веома је битно нагласити да се у случају примјене стандардног модела ужади ($Z_{c,v}$) највиши напон добија на горњем изолаторском ланцу вода. У случају примјене LCC модела ужади највиши напон се добија на најнижем изолаторском ланцу због његове најслабије електромагнетне спреге са заштитним ужетом и самим тим најнижег индукованог напона. Примјеном најједноставнијег модела ($Z_{c,v} (U_r=0)$) и најсложенијег модела (LCC ($U_r=U_{\max}$)) добијају се приближно једнаки резултати. Разлог томе је што се индуковани напон на ужадима, у случају примјене LCC модела, дјелимично поништава са радним напоном вода који је изабран тако да има супротан знак у односу на атмосферски пренапон, тј. индуковани напон.

4.3. Модел стуба

Према IEEE препоруци [45] стубови вода типа јела односно Y се моделују карактеристичном импедансом која се рачуна према формулама (4.15) и (4.16) респективно. Брзина простирања таласа кроз стуб у оба случаја је једнака 0.85 пута брзина свјетлости, док је у осталим моделима у овом поглаљу једнака брзини свјетлости.

$$Z_{tjela} = 30 \cdot \ln \left(\frac{2(h^2 + r^2)}{r^2} \right) \quad (4.15)$$

$$Z_{t,Y} = 60 \cdot \left(\ln \left(\sqrt{2} \frac{2h}{r} \right) - 1 \right) \quad (4.16)$$

гдје су: h - висина стуба [m],

r - полупречник основе стуба [m].

Конзола стуба се у прорачунима скоро увијек занемарује [147],[154], а може да се моделује или као кратак вод или преко индуктивитета подужне индуктивности 1 $\mu\text{H/m}$ [144].

Стуб надземног вода се може моделовати и преко израза (4.17) који је предложен у [166] и прихваћен у [144]. Овим изразом се рачуна карактеристична импеданса еквивалентне купе.

$$Z_t = 60 \cdot \ln \left(\frac{\sqrt{2}h}{r} \right) \quad (4.17)$$

гдје су: h - висина стуба [m],

r - полупречник основе стуба [m].

Карактеристична импеданса стуба може да се рачуна и примјеном израза (4.18) који је предложен у [167] и прихваћен у [144]:

$$Z_t = 60 \cdot \ln \left(\text{ctg} \left[0.5 \cdot \arctan \left(\frac{r_{sr}}{h} \right) \right] \right) \quad (4.18)$$

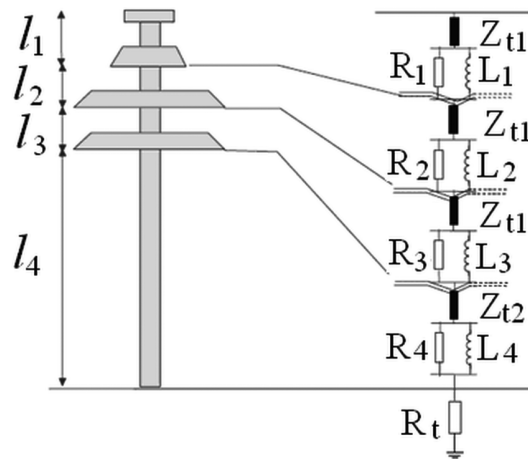
гдје су: h - висина стуба [m],

r_{sr} - средњи полупречник стуба [m], рачуна се примјеном израза (4.19):

$$r_{sr} = \frac{r_1 h_2 + r_2 (h_1 + h_2) + r_3 h_1}{h} \quad (4.19)$$

- гдје су: r_1 - полупречник врха стуба [m],
 r_2 - полупречник средине стуба [m],
 r_3 - полупречник базе стуба [m],
 h_1 - дужина стуба од темеља до конзоле [m],
 h_2 - дужина стуба од конзоле до заштитног ужета [m].

Комплексни модел стуба (тзв. multistory) је најсложенији и развијен је на основу експерименталних мјерења расподјеле ударних напона дуж стуба за 500 kV вод који је снадбјевен заштитним ужетом. Модел је предложен у [154], прихваћен је у [144],[147],[165], и приказан је на слици 4.2. Комплексни модел стуба се може примјенити само на стубове са вертикалним распоредом фазних проводника.



Слика 4.2 – Комплексни модел стуба [154]

Ознаке на слици 4.2 имају сљедеће значење:

- карактеристичне импедансе: $Z_{t1}=220 \Omega$, $Z_{t2}=150 \Omega$,
- брзина простирања таласа: $v_t=300 \text{ m}/\mu\text{s}$,
- временска константа (вријеме простирања по стубу $\times 2$): $\tau=2 \cdot h/v_t$,
- пригушење дуж стуба: $\gamma=0,8944$,
- пригушна отпорност по једини дужине за горњи и доњи дио стуба респективно:
 $r_1=-2 \cdot Z_{t1} \cdot \ln(\gamma)/(l_1+l_2+l_3)$, $r_2=-2 \cdot Z_{t2} \cdot \ln(\gamma)/l_4$,
- $R_1=r_1 \cdot l_1$, $R_2=r_1 \cdot l_2$, $R_3=r_1 \cdot l_3$, $R_4=r_2 \cdot l_4$, гдје су l_1 , l_2 , l_3 , l_4 дужине појединих дијелова стуба,
- $L_1=R_1 \cdot \tau$, $L_2=R_2 \cdot \tau$, $L_3=R_3 \cdot \tau$, $L_4=R_4 \cdot \tau$.

У табели 4.5 су приказани прорачунати параметри различитих модела стуба. У табели 4.6 је приказан утицај тих модела на прорачунате минималне амплитуде струја атмосферских пражњења које узрокују повратни прескок на воду.

Табела 4.5 – Прорачунати параметри стуба према различитим моделима

Модел	Прорачунати параметри модела	Улазни подаци
(4.15)	$Z_f=148 \Omega$ и $v_f=255 \text{ m}/\mu\text{s}$	$h=25 \text{ m}$, $r=3 \text{ m}$
(4.17)	$Z_f=148 \Omega$ и $v_f=300 \text{ m}/\mu\text{s}$	$h=25 \text{ m}$, $r=3 \text{ m}$
(4.18)	$Z_f=160 \Omega$ и $v_f=300 \text{ m}/\mu\text{s}$	$h=25$; $h_1=16$; $h_2=9$ [m] $r_1=0,5$; $r_2=1,4$; $r_3=3$ [m]
Комплексни	$Z_{t1}=220$; $Z_{t2}=150$ [Ω] $R_1=27,3$; $R_2=R_3=10,9$; $R_4=33,5$; [Ω] $L_1=4,6$; $L_2=L_3=1,8$; $L_4=5,6$; [μH] Брзина простирања: $300 \text{ m}/\mu\text{s}$	$l_1=5$; $l_2=l_3=2$; $l_4=16$ [m]

Табела 4.6 – Утицај модела стуба вода на амплитуду струје пражњења довољну да изазове повратни прескок на воду

Мјесто пражњења	Модел стуба	Амлитуда струје пражњења која узрокује повратни прескок		
		110 kV	220 kV	400 kV
Напонски ниво		110 kV	220 kV	400 kV
Распон	(4.15)	79 kA	131 kA	204 kA
	(4.17)	79 kA	131 kA	205 kA
	(4.18)	79 kA	131 kA	204 kA
	Комплексни	75 kA	125 kA	195 kA
Врх стуба	(4.15)	48 kA	79 kA	124 kA
	(4.17)	48 kA	80 kA	124 kA
	(4.18)	48 kA	79 kA	124 kA
	Комплексни	47 kA	78 kA	121 kA

Комплексни модел стуба даје незнатно ниже вриједности амплитуда струја пражњења које изазивају испад вода из погона, али су разлике занемариве. Због тога се у прорачунима могу користити једноставни модели стуба. На овај начин се прорачун и еквивалентна шема система знатно поједностављују, а не утиче се на

тачноћ добијених резултата. Недостатак комплексног модела стуба, поред чињенице да има компликовану еквивалентну шему и сложен поступак прорачуна параметара, је и чињеница да су поједини параметри модела фиксни и не зависе од димензија и врсте стуба ($Z_{t1}=220 \Omega$, $Z_{t2}=150 \Omega$, $\gamma=0,8944$). Комплексни модел стуба се може користити у случајевима када се жели добити што вјернији таласни облик пренапона у некој тачки на воду.

4.4. Модел уземљивача стуба

Карактеристике уземљивача стубова приликом дјеловања импулсних струја и напона су детаљно дискутоване у поглављу 2.3. Најједноставнији модел уземљивача стуба усваја да је импулсна импеданса уземљивача константна и једнака његовој отпорности распрострањања мјереној при ниској фреквенцији и малој амплитуди струје одвођења [34],[145],[165]. Овај модел је најпростији за кориштење, али је истовремено и најмање тачан јер не обухвата ниједан од процеса који се на уземљивачу одвијају за вријеме одвођења струја атмосферских пражњења.

Према [33],[34],[145],[146] приликом прорачуна атмосферских пренапона на надземним водовима веома је битно да се уважава појава јонизације тла у околини уземљивача. У [145] је предложено да се отпорност уземљивача на коме се уважава појава јонизације тла моделује кориштењем израза (4.20). У овом случају уземљивач се моделује као нелинеарни струјно контролисан отпорник. Овај модел уземљивача стуба је прихваћен у [33],[34],[141],[146].

$$R = \begin{cases} R_0, & I \leq I_g \\ \frac{R_0}{\sqrt{1 + \frac{I}{I_g}}}, & I > I_g \end{cases} \quad (4.20)$$

гдје су: R_0 - отпорност уземљења стуба мјерена при ниској фреквенцији и малој вриједности струје која се одводе са уземљивача [Ω],

I - струја која се одводи са уземљивача [кА],

I_g - гранична вриједност струје при којој се јавља јонизација тла око уземљивача [кА], рачуна се из израза (4.21):

$$I_g = \frac{E_0 \cdot \rho}{2 \cdot \pi \cdot R_0^2} \quad (4.21)$$

гдје су: E_0 – критична јачина електричног поља при којој се јавља јонизација тла, према [34],[145],[146] има вриједност од 400 kV/m,
 ρ - специфична електрична отпорност тла [Ωm].

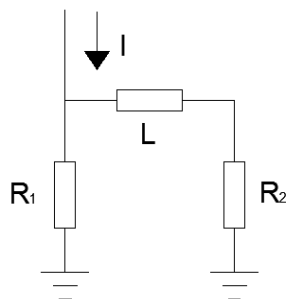
У случају када није позната измјерена вриједност отпорности распростирања уземљивача R_0 , уобичајена је пракса [168] да се R_0 рачуна примјеном формуле (4.22) која је изведена за полусферни уземљивач:

$$R_0 = \frac{\rho}{2 \cdot \pi \cdot r} \quad (4.22)$$

гдје су: ρ - специфична електрична отпорност тла [Ωm],
 r - полупречник уземљивача [m].

Модел уземљивача стуба који уважава појаву јонизације тла се у програмском пакету ЕМТР-АТР реализује преко струјно контролисаног нелинеарног отпорника R(TACS) Туре 91 и примјеном програмског језика MODELS [169]. Док је струја која се одводи са уземљивача мања од граничне струје I_g , сматра се да је отпорност уземљивача константна и једнака вриједности R_0 . У супротном се уважава појава јонизације тла и отпорност распростирања уземљивача се моделује преко израза (4.20).

Поред претходно наведена два модела уземљивача који се најчешће користе, постоје и напредни импулсни модели уземљивача који поред јонизације тла уважавају и остале импулсне процесе који се одвијају на уземљивачу. Два су основна приступа у анализи импулсних модела уземљивача, приступ базиран на примјени теорије електричних кола и приступ базиран на примјени теорије електромагнетних поља. У [64],[66],[170]-[172] је описан математички модел импулсне карактеристике уземљивача који је базиран на теорији електричних кола. На бази тог модела је реализован програмски пакет GIC (Grounding Impulse Characteristics) [64],[170]. Овај модел уземљивача се може представити преко еквивалентне шеме приказане на слици 4.3 [64]. Сличан модел уземљивача је предложен и у [144]. Програмски пакет GIC прорачунава параметре L , R_1 и R_2 у зависности од облика и димензија уземљивача, специфичне електричне отпорности тла итд.



Слика 4.3 – Импулсни модел уземљивача базиран на примјени теорије електричних кола [64]

Поред наведеног модела који је реализован примјеном теорије електричних кола, велики број аутора користи моделе развијене примјеном теорије електромагнетних поља [173],[174]. Поређење различитих импулсних модела уземљивача је приказано у [175]. Више детаља о различитим моделима уземљивача се може наћи у [150]. Проблем који се јавља приликом кориштења сложених модела уземљивача је што се морају познавати конфигурација уземљивача и карактеристике тла, а мора се развити и програм помоћу ког ће се вршити прорачуни. Због тога су једноставни модели уземљивача најзаступљенији у инжењерским прорачунима и они ће се користити и анализирати и у овом раду.

У табели 4.7 су приказане прорачунате минималне амплитуде струја атмосферског пражњења које изазивају појаву повратног прескока на воду у случају примјене различитих модела уземљивача стуба. Утицај јонизације тла на добијене резултате је веома изражен. Разлог томе је што се отпорност уземљења стуба знатно смањује након појаве јонизације тла услед чега се струја атмосферског пражњења интензивније одводи у тло. То доводи до знатног смањења висине пренапона на воду и до смањења вјероватноће појаве испада вода из погона. Резултати прорачуна за 400 kV вод нису приказани због веома високих амплитуда струја пражњења потребних да изазову повратни прескок у случају када се моделује јонизација тла. У прорачунима је јонизацију тла неопходно моделовати јер има изражен утицај на добијене резултате. У случају када се анализирају водови са изузетно великим отпорностима уземљења стубова (нпр. $\geq 100 \Omega$) јонизација тла се мора моделовати јер се у супротном добијају нереални резултати (вод приближно постаје еквипотенцијална површ) јер се струја пражњења веома тешко одводи у тло.

Табела 4.7 – Утицај модела уземљивача стуба на амплитуду струје пражњења довољну да изазове повратни прескок на воду

Мјесто пражњења	Модел уземљивача	Амплитуда струје пражњења која узрокује повратни прескок	
Напонски ниво		110 kV	220 kV
Распон	Константна отпорност (15 Ω)	79 kA	131 kA
	Јонизација тла (15 Ω , 200 Ωm)	79 kA	131 kA
	Јонизација тла (15 Ω , 100 Ωm)	107 kA	199 kA
Врх стуба	Константна отпорност (15 Ω)	48 kA	79 kA
	Јонизација тла (15 Ω , 200 Ωm)	48 kA	79 kA
	Јонизација тла (15 Ω , 100 Ωm)	64 kA	115 kA

4.5. Модел прескока на ваздушној изолацији

Прескоци на надземним водовима се дешавају усљед дјеловања пренапона индустријске учестаности, склопних ударних пренапона и атмосферских ударних пренапона. За све три врсте пренапона се користе различити модели прескока. У случају дјеловања ударних атмосферских пренапона најчешће се користи неки од следећа три модела [34],[143]-[145]:

- 1) метода волт - секундне криве изолације (V-t крива),
- 2) метода површине (EA),
- 3) метода прогресивног лидера (LPM).

Детаљна анализа ових модела се може наћи у [149],[150],[176].

Изолаторски ланац се најчешће моделује као идеални напонски контролисан прекидач [34],[144]. У програмском пакету EMTP-ATP тај прекидач има ознаку TACS switch (type 13), а модел прескока се имплементира у програмском језику MODELS [169]. Електрични лук, који се јавља након појаве прескока на изолаторском ланцу, у овом раду није од интереса јер се анализирају процеси на воду који се одвијају до тренутка појаве прескока. Моделовање електричног лука може бити од интереса у процесу пројектовања заштите високонапонских постројења. У том случају он се може моделовати преко индуктивности подужне индуктивности 1 $\mu\text{H/m}$ [34],[144].

4.5.1. Метода волт - секундне криве изолације

Метода V-t криве изолације је предложена у [177] и прихваћена је у [34],[45],[143]-[146]. Аналитички израз којим се дефинише V-t крива изолације је:

$$U(t) = K_1 + \frac{K_2}{t^{0,75}} \quad (4.23)$$

гдје су: K_1 - емпиријска константа која је дефинисана као $400 \cdot d$,

K_2 - емпиријска константа која је дефинисана као $710 \cdot d$,

d - дужина међуелектродног растојања [m],

t – вријеме, посматрано од тренутка наилаaska пренапона на изолатор [μ s].

Битно је примјетити да вријеме t није вријеме од почетка симулације, него вријеме од тренутка када се пренапон појави на изолаторском ланцу.

Израз (4.23) је валидан за времена до прескока од $0,5 \mu$ s до 16μ s. Метода V-t криве изолације представља један од првих модела прескока на ваздушној изолацији, широко је примјењена у инжењерској пракси и прихваћена је у скоро свим међународним стандардима. Основни недостатак ове методе је што је изведена за стандардни ударни напонски талас облика $1,2/50 \mu$ s/ μ s тако да у нумеричким прорачунима, у којима се појављују пренапони нестандартних таласних облика, може да има знатна одступања у односу на друге методе [141],[149],[150],[176]. Други битан недостатак је што метода комбинује вриједности физичких величина које нису директно повезане. Наиме, V-t крива се добија повезивањем парова тачака (U, t), при чему је U амплитуда пренапонског таласа који је изазвао прескок, а t је тренутак када се прескок десио. При томе се прескок практично никада не дешава при максималној вриједности напона U , него се дешава или на челу или много чешће на зачељу таласа. Због тога вриједности U и t нису из истог временског тренутка.

4.5.2. Метода површине

Метода површине (ЕА) се базира на чињеници да процес развоја прескока на ваздушној изолацији не зависи само од амплитуде напона који напреже изолацију, него и од времена изложености изолације дјеловању тог напона. Метода површине представља специјални случај методе деструктивног ефекта [178]. Идеја методе деструктивног ефекта се може изразити на сљедећи начин:

Постоји базни деструктивни ефекат A_k . Ако нестандартни таласни облик пренапона има деструктивни ефекат (DE) који превазилази базни деструктивни ефекат A_k прескок на изолацији се јавља, и обратно, ако нестандартни таласни облик пренапона нема DE који превазилази A_k прескок на изолацији се неће појавити. Израз за прорачун деструктивног ефекта је (4.24):

$$DE = \int_{t_0}^{t_b} [u(t) - V_0]^{k_d} dt \quad (4.24)$$

гдје су: $u(t)$ - тренутна вриједност пренапона [kV],

V_0 - амплитуда напона испод које није могуће да се деси прескок [kV],

k_d - емпиријска константа,

t_0 - тренутак када примјењени пренапонски талас превазиђе напон V_0 [μ s],

t_b - тренутак када се деси прескок на изолацији [μ s].

У [145],[179],[180] је показано да је одређивање константи V_0 , k_d и A_k у методи деструктивног ефекта доста компликовано јер оне зависе од таласног облика и поларитета пренапона, као и од облика и растојања између искришта. Ради поједностављења методе усвојено је да је вриједност константе k_d једнак 1. У том случају је добијена метода еквивалентне површине или краће метода површине [180] која је дефинисана изразом (4.25):

$$DE = \int_{t_0}^{t_b} (u(t) - V_0) dt \quad (4.25)$$

Ознаке су исте као у изразу (4.24). Основни недостатак методе површине је што нема довољну тачност у случају када напон на изолаторском ланцу осцилује тако да му вриједност пада испод критичне вриједности напона V_0 [143]. Вриједности константи за методу површине се могу рачунати из израза (4.26) [180]:

$$\begin{aligned} V_0 &= (0,82 \div 0,92) \cdot U_{50\%} \\ A_k &= (380 \div 560) \cdot d \end{aligned} \quad (4.26)$$

гдје су: $U_{50\%}$ - 50%-тни прескочни напон изолатора [kV],

d - дужина међуелектродног растојања [m].

У [141],[149] су препоручене сљедеће вриједности константи:

$$V_0 = 0,934 \cdot U_{50\%} \quad \text{и} \quad A_k = 520 \cdot d \quad (4.27)$$

Зависност 50%-тног прескочног напона ваздушне изолације од растојања између електрода је дефинисана преко израза (4.28) [143]:

$$U_{50\%} = 530 \cdot d \quad (4.28)$$

Комбиновањем израза (4.27) и (4.28) добија се израз (4.29) [141],[149]:

$$V_0 = 0,934 \cdot U_{50\%} = 0,934 \cdot 530 \cdot d = 495 \cdot d \quad (4.29)$$

гдје је: d - дужина међуелектродног растојања [m].

Дакле, обје константе у методи површине су дефинисане у зависности од дужине међуелектродног растојања преко израза (4.30) [141],[149]:

$$V_0 = 495 \cdot d \quad \text{и} \quad A_k = 520 \cdot d \quad (4.30)$$

гдје је: d - растојање између искришта [m].

4.5.3. Метода прогресивног лидера

Метода прогресивног лидера (LPM) се базира на моделовању реалних процеса који се одвијају у ваздуху за вријеме дјеловања импулсних пренапона [181]. Вријеме које је потребно да би се између електрода јавио прескок може се рачунати преко израза (4.31) [145],[181]:

$$T_t = T_C + T_S + T_L \quad (4.31)$$

гдје је: T_C - вријеме развијања короне [μ s],

T_S - вријеме развијања стримера [μ s],

T_L - вријеме развијања лидера [μ s].

Према [143]-[145] вријеме T_C се може занемарити. У скоро свим моделима који се користе се претпоставља да је фаза развијања стримера завршена када јачина електричног поља достигне критичну вриједност E_0 [143]. Због тога се усваја претпоставка да док год је јачина електричног поља у међуелектродном простору мања од критичне вриједности E_0 не дешава се развој лидера, а када јачина електричног поља превазиђе вриједност E_0 лидер почиње да се развија брзином v . Ако у било ком тренутку јачина електричног поља падне испод вриједност E_0 сматра се да нема даљег повећања дужине лидера све док вриједност електричног поља поново не порасте изнад вриједности E_0 .

Брзина развијања лидера између електрода се може моделовати примјеном различитих израза [181], а једна од општијих је (4.32) [141],[143],[145],[181]:

$$v = 170 \cdot d \cdot \left[\frac{u(t)}{x} - E_0 \right] \cdot e^{(0,0015 \cdot \frac{u(t)}{d})} \quad (4.32)$$

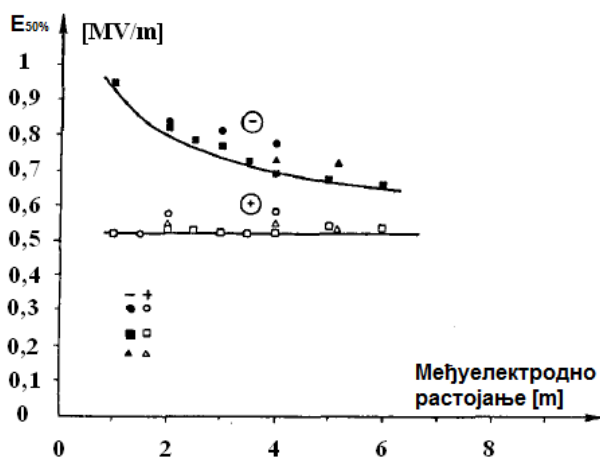
гдје су: d - растојање између искришта [m],

$u(t)$ - тренутна вриједност напона [kV],

x - дужина непремоштеног међуелектродног растојања [m],

E_0 - критична јачина електричног поља при којој почиње развој лидера, према [141],[181] може се усвојити вриједност од 545 [kV/m].

Вриједност критичне јачине електричног поља при којој почиње развој лидера E_0 зависи од дужине међуелектродног растојања, облика и поларитета таласа, облика електрода и слично. Вриједност E_0 за случај електрода облика шиљак-плоча и у случају дјеловања таласа оба поларитета је графички приказана на слици 4.4 [181]. Вриједност E_0 је практично константна за позитивне пренапонске таласе, док је за негативне таласе изразито нелинеарна. Вриједности константе E_0 за негативне пренапоне су веће, а пошто се у прорачунима иде на страну сигурности стандардно се усвајају вриједности које се односе на позитивне пренапоне.



Слика 4.4 - Зависност вриједности E_0 од међуелектродног растојања за случај електрода облика шиљак – плоча [181]

4.5.4. Поређење различитих модела прескока

У табелама 4.8 и 4.9 су приказане минималне вриједности амплитуда струја пражњења при којима се дешава повратни прескок на водовима називних напона 110 kV, 220 kV и 400 kV у случају пражњења у средину распона и у врх стуба. Слични резултати су приказани и у [141],[149]. Метода површине и метода прогресивног лидера дају приближно једнаке резултате, док се примјеном V-t криве добијају знатно ниже вриједности критичних струја пражњења.

Табела 4.8 – Утицај модела прескока на амплитуду струје пражњења довољну да изазове повратни прескок на воду у случају пражњења у средину распона

Називни напона и међуелектродно растојање	Број распона	Струја пражњења која изазива појаву квара [kA]		
	Модел прескока	V-t	LPM	DE
110 kV и 0.96 m	1	61	72	69
	3	79	94	96
	7	79	95	97
220 kV и 1.61 m	1	102	119	114
	3	131	157	160
	7	131	159	161
400 kV и 2.5 m	1	159	186	178
	3	204	245	249
	7	204	248	251

Табела 4.9 – Утицај модела прескока на амплитуду струје пражњења довољну да изазове повратни прескок на воду у случају пражњења у врх стуба

Називни напона и међуелектродно растојање	Број стубова	Струја пражњења која изазива појаву квара [kA]		
	Модел прескока	V-t	LPM	DE
110 kV и 0.96 m	1	31	37	35
	3	48	59	60
	7	48	60	61
220 kV и 1.61 m	1	52	61	58
	3	79	99	100
	7	80	100	101
400 kV и 2.5 m	1	81	95	91
	3	124	154	156
	7	125	156	158

Имајући у виду приказане резултате, као и много опширнију анализу која се може наћи у [149], закључује се да V-t криву као модел прескока на изолаторским ланцима у нумеричким прорачунима треба избјегавати. Предност се даје методи прогресивног лидера у односу на методу површине. Први разлог за то је што се метода прогресивног лидера базира на моделовању процеса који се јављају у међуелектродном простору прије и за вријеме развоја прескока. Други разлог је што ова метода има добру тачност и у случају појаве изразито осцилаторних пренапона на изолаторским ланцима.

Оптималан број распона, односно стубова, у еквивалентној шеми вода је једнак три [141],[149], слика 4.1. Дакле, у случају пражњења у средину распона вода потребно је моделовати распон у који се десило пражњење и по један распон са његове лијеве и десне стране. У случају пражњења у врх стуба потребно је моделовати погођени и два сусједна стуба. Моделовање већег броја распона, односно стубова вода, компликује еквивалентну шему и продужава трајање прорачуна, а нема утицај на добијене резултате. Амплитуде струја пражњења које изазивају повратни прескок на воду су знатно ниже у случају пражњења у врх стуба него у случају пражњења у средину распона вода. Разлог за то је што се у случају пражњења у врх стуба знатно већи дио струје пражњења затвара кроз стуб и његов уземљивач. Усљед тога и пренапони на конзоли стуба имају знатно вишу вриједност па је и вјероватноћа појаве повратног прескока већа.

4.6. Модел одводника пренапона

Линијски одводници пренапона су детаљно анализирани у поглављу 3.1 у којем је наведено да постоје двије основне врсте ових уређаја, одводници без екстерног искришта и одводници са екстерним искриштем. У овом раду су анализирани линијски одводници без екстерног искришта. Они су погоднији за примјену у нашим условима због непостојања акредитованих високонапонских лабораторија у којима би се димензионисало растојање екстерног искришта. Ово растојање мора бити довољно дуго да одводник не реагује на склопне и привремене пренапоне, али мора бити и довољно кратко како би одводник реаговао на атмосферске пренапоне прије него се догоди прескок на штићеном изолатору [104]. Други разлог зашто нису анализирани линијски одводници са

екстерним искриштима је тај што су подаци о њима знатно слабије доступни, или нису уопште доступни, у електронским брошурама произвођача.

Најједноставнији начин моделовања одводника пренапона је преко његове $U-I$ нелинеарне карактеристике добијене дјеловањем ударног струјног таласа облика $8/20 \mu\text{s}/\mu\text{s}$ [144],[146]. Ова карактеристика се може једноставно пронаћи у електронским каталозима произвођача опреме. Једна таква карактеристика за одводник пренапона називног напона 192 kV који је предвиђен за рад у 220 kV систему је приказана у табели 4.10 [83]. Спојни проводници линијских одводника пренапона се могу занемарити, у супротном се могу моделовати или као кратки водови или преко индуктивитета подужне индуктивности $1 \mu\text{H}/\text{m}$ [144].

Табела 4.10 – $U-I$ карактеристика одводника пренапона називног напона 192 kV произвођача АВВ [83]

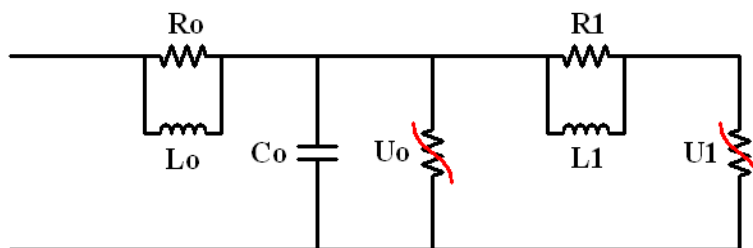
Струја [кА]	Напон [кV]
5	415
10	437
20	479
40	525

Модел одводника пренапона преко нелинеарне $U-I$ карактеристике се у програму ЕМТР-АТР може реализовати примјеном нелинеарног отпорника R(i) type 92. Употреба псеудо-нелинеарног отпорника R(i) type 99 се не предлаже јер овај модел може имати слабу тачност приликом преласка са једног на други линеарни сегмент $U-I$ карактеристике, поготово ако се прорачун врши за веома брзе пренапоне [146]. У оба модела одводника пренапона, R(i) type 92 и R(i) type 99, аутоматски се усваја да је једна од тачака $U-I$ карактеристике координатни почетак (0,0). Нелинеарна карактеристика одводника пренапона се између свих дефинисаних тачака моделује линеарном интерполацијом. Овакав приступ није задовољавајући у опсегу малих струја одвођења, у овом случају у интервалу $0 \div 5$ kA, поготово ако се врши прорачун енергетског напрезања одводника пренапона. Наиме, $U-I$ карактеристика одводника пренапона из табеле 4.10 је у опсегу струја од $0 \div 5$ kA описана изразом $U=83 \cdot I$ (једначина праве кроз двије тачке, (0,0) и (415 kV, 5 kA)). Ефективна вриједност фазног радног

напона у 220 kV систему је око 127 kV тако да би струја кроз одводник пренапона усљед дјеловања фазног радног напона била $I=U/83=127000/83=1530$ А што је потпуно нереално. Овај проблем се рјешава тако што се прорачуна вриједност преосталог напона одводника пренапона за неку произвољно малу струју [153], нпр. 0,1 mA. Прорачун преосталог напона одводника за малу струју одвођења (нпр. 0,1 mA) се врши линеарном екстраполацијом познатих вриједности са $U-I$ карактеристике за двије тачке са минималном струјом одвођења, у овом случају то су тачке (415,5) и (437,10) [kV,kA], табела 4.10. Добија се да преостали напон одводника за струју одвођења од 0,1 mA износи 393 kV. Нелинеарна $U-I$ карактеристика одводника у опсегу струја од 0,1 mA÷5 kA ($393\text{ kV}\leq U\leq 415\text{ kV}$) је описана изразом $U=4,4\cdot I+393$ [kV], I је у [kA], док је у опсегу струја $0\div 0,1$ mA ($U\leq 393\text{ kV}$) описана изразом $U=3930\cdot I$ [kV], I је у [mA]. Ефективна вриједност струје кроз одводник пренапона усљед дјеловања фазног радног напона ($U=127\text{ kV}$) би у овом случају била $I=U/3930=127/3930=0,032$ mA.

Наведени проблем моделовања одводника пренапона се може рјешити и тако што се у моделу одводника $R(i)$ типе 92 унесе вриједност прескочног напона виртуелног серијског искришта. За напоне на одводнику који су нижи од дефинисаног одводник не би проводио струју. Након превазилажења критичне вриједности напона десила би се прорада искришта и одводник би почео да се понаша као нелинеарни отпорник. У овом раду је усвојен први приступ.

Сложенији модел одводника пренапона је фреквенцијски зависан модел, слика 4.5, који је предложен у [182], а прихваћен је у [34],[146]. Овај модел одводника пренапона је уведен јер преостали напон на одводнику не зависи само од амплитуде струје која се кроз њега одводи, као што је то случај код примјене $U-I$ карактеристике, него и од стрмине струјног таласа. Због тога се примјена фреквенцијски зависног модела одводника предлаже у случајевима када се на одводнику појављују веома стрми таласи. Два су основна недостатка овог модела, први је што осјетно повећава вријеме прорачуна јер садржи два нелинеарна елемента, а други је што није лако пронаћи све потребне улазне податке за прорачун параметара модела, првенствено када је у питању број колона нелинеарних отпорника.



Слика 4.5 - Фреквенцијски зависан модел одводника пренапона [182]

Параметри модела са слике 4.5 се рачунају према формулама (4.33), а добијене вриједности се изражавају у сљедећим мјерним јединицама: (R_0, R_1 [Ω]; L_0, L_1 [μH]; C_0 [pF]; U_0, U_1 [kV]).

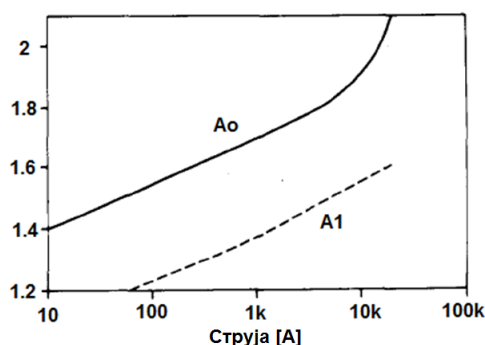
$$\begin{aligned} R_0 &= 100 \cdot d / n ; & R_1 &= 65 \cdot d / n ; & L_0 &= 0,2 \cdot d / n ; & L_1 &= 15 \cdot d / n \\ C_0 &= 100 \cdot n / d ; & U_0 &= A_0 \cdot U_{10} / 1,6 ; & U_1 &= A_1 \cdot U_{10} / 1,6. \end{aligned} \quad (4.33)$$

гдје су: n - број паралелних колона нелинеарних блокова,

d - висина одводника пренапона [m],

A_0 и A_1 - струјно зависне константе које се одређују са слике 4.6 [182],

U_{10} - преостали напон на одводнику [kV] при одвођењу струје амплитуде 10 kA таласног облика $8/20 \mu\text{s}/\mu\text{s}$.



Слика 4.6 - Вриједности константи A_0 и A_1 у функцији струје одвођења [182]

Одводник пренапона, чија је $U-I$ карактеристика приказана у табели 4.10, је према каталожним подацима висок $2,1 \text{ m}$ [83], а напон U_{10} му је једнак 437 kV [83]. У том случају вриједности непознатих из израза (4.33) износе:

1. Једна колона нелинеарних отпорника:

$$R_0=210 [\Omega], R_1=137 [\Omega], L_0=0,42 [\mu\text{H}], L_1=32 [\mu\text{H}], C_0=48 [\text{pF}].$$

2. Двије колоне нелинеарних отпорника:

$$R_0=105 [\Omega], R_1=69 [\Omega], L_0=0,21 [\mu\text{H}], L_1=16 [\mu\text{H}], C_0=96 [\text{pF}].$$

Прорачунате вриједности параметара елемената U_0 и U_1 су дате у табели 4.11.

Прорачун за једну вриједност струје, нпр. 10 kA , се врши на сљедећи начин: Са

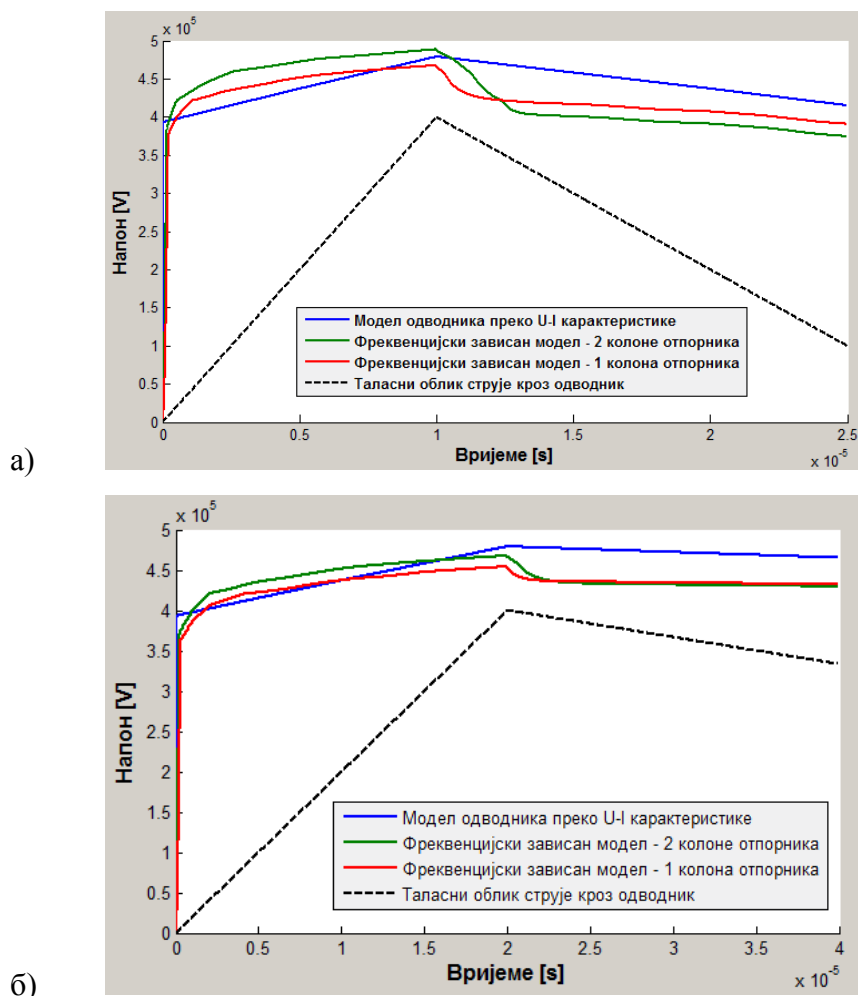
слике 4.6 се читају вриједности константи A_0 и A_1 које одговарају струји од 10 kA и које редом износе 1,9 и 1,55. Из израза (4.33) се рачунају напони U_0 и U_1 и у овом случају они износе 519 kV и 423 kV. Прорачун се врши за више вриједности струја и на тај начин се формирају нелинеарне $U-I$ карактеристике отпорника U_0 и U_1 .

Табела 4.11 – Вриједности константи A_0 и A_1 и вриједности напона U_0 и U_1

Струја [kA]	Вриједност константе A_0	Напон U_0 [kV]	Вриједност константе A_1	Напон U_1 [kV]
0,01	1,40	382	-	-
0,1	1,54	421	1,23	336
1	1,68	459	1,36	371
2	1,74	475	1,43	391
4	1,80	492	1,48	404
6	1,82	497	1,50	410
8	1,87	511	1,53	418
10	1,90	519	1,55	423
12	1,93	527	1,56	426
14	1,97	538	1,58	432
16	2,00	546	1,59	434
18	2,05	560	1,60	437
20	2,10	574	1,61	440

Поређење два описана модела одводника пренапона је урађено тако што је рачунат преостали напон на одводнику у случају одвођења ударне струјне троугаоног таласног облика амплитуде 20 kA. Сви прорачуни у овом раду се врше примјеном струјног таласа облика 10/350 $\mu\text{s}/\mu\text{s}$, односно 5,6/78 $\mu\text{s}/\mu\text{s}$. Стрмина чела струјних таласа који протичу кроз линијске одводнике пренапона је додатно смањена усљед простирања таласа по воду, а трајање таласа је скраћено јер линијски одводник проводи струју само за одређене вриједности пренапона. Због тога су прорачуни преосталог напона линијских одводника рађени са струјним таласима облика 10/20 $\mu\text{s}/\mu\text{s}$ и 20/80 $\mu\text{s}/\mu\text{s}$, слика 4.7 а) и б) респективно. Трајање чела и зачеља таласа је варирано како би се испитао утицај стрмине таласа на

вриједност преосталог напона. Добијени резултати су приказани на слици 4.7 [150]. Таласни облик струје на слици 4.7 је скалиран 20 пута. У случају дјеловања стрмијих таласа модел одводника пренапона преко $U-I$ карактеристике даје ниже вриједности пренапона на челу таласа у односу на фреквенцијски зависан модел јер занемарује индуктивни пад напона на одводнику. Разлика је уочљивија код таласа веће стрмине [150]. На зачелју таласа ситуација је обрнута. Повећањем броја колона нелинеарних отпорника унутар одводника пренапона расте преостали напон на челу таласа.



Слика 4.7 – Утицај модела одводника пренапона на његов преостали напон за струјни талас троугаоног облика са амплитудом струје од 20 kA и са параметрима а) 10/20 $\mu\text{s}/\mu\text{s}$ б) 20/80 $\mu\text{s}/\mu\text{s}$

У овом раду је потпуно оправдано користити модел линијског одводника пренапона преко његове $U-I$ карактеристике. Велика предност овог модела, због које се он веома често користи у прорачунима, је једноставан начин примјене.

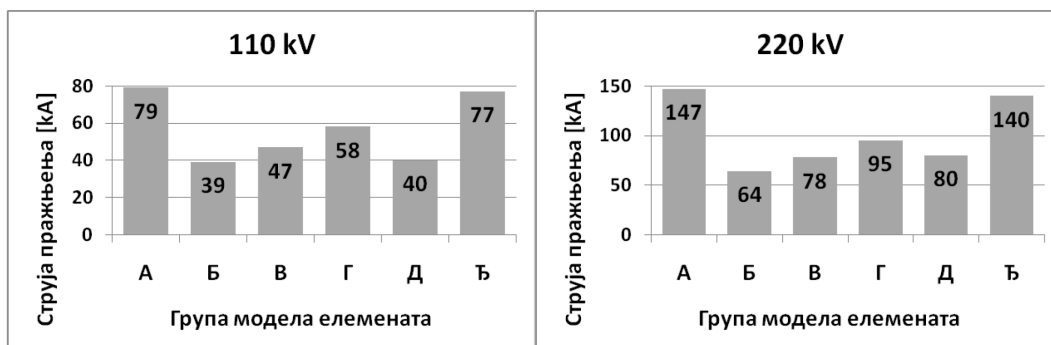
Додатна предност је та што ваздушна изолација слабије подноси таласе дужег трајања, а $U-I$ модел одводника пренапона даје више пренапоне на зачељу таласа у односу на фреквенцијски зависан модел. Фреквенцијски зависан модел одводника може да се користи за прорачуне угрожености опреме у постројењима од атмосферских пренапона с обзиром да се добијају више вриједности преосталог напона за таласе веће стрмине. Такви таласи се и појављују у постројењима као последица повратних прескока на прилазним водовима.

4.7. Кумулативни утицај модела елемената на резултате прорачуна

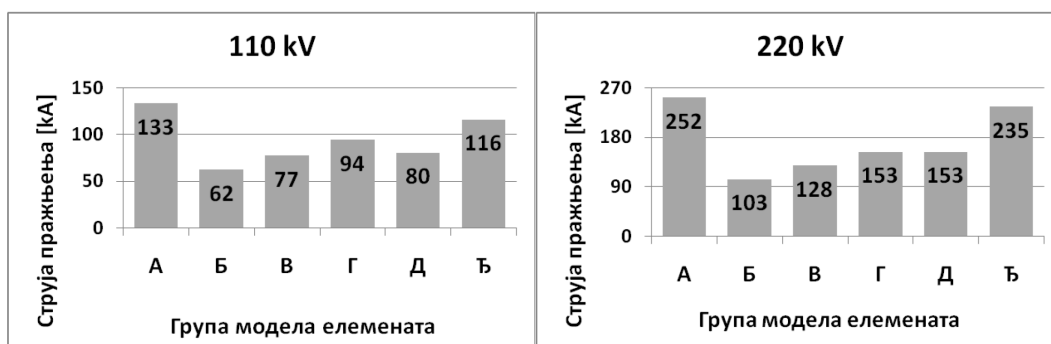
У претходним анализама је показано да различити модели истог елемента имају већи или мањи утицај на резултате нумеричких прорачуна. У овом поглављу је анализиран кумулативни утицај различитих модела елемената на добијене резултате. Модели елемената су подјелиени у шест група, као што је приказано у табели 4.12 [141]. Прорачун је рађен за еквивалентне шеме приказане на слици 4.1 и са улазним подацима из табеле 4.1. Добијени резултати су приказани на сликама 4.8 и 4.9.

Табела 4.12 – Анализиране групе модела елемената

Елемент еквивалентне шеме	Модел елемената		
	Група А	Група Б	Група В
Таласни облик струје	Heidler	Cigre	Троугаони
Z_c канала пражњења	400 Ω	∞	1000 Ω
Стуб вода	IEEE (4.15)	Комплексни	IEEE (4.15)
Уземљивач стуба	Јонизација	R_{const}	R_{const}
Прескок на изолатору	LPM	V-t	V-t
Елемент еквивалентне шеме	Модел елемената		
	Група Г	Група Д	Група Ђ
Таласни облик струје	Cigre	Cigre	Cigre
Z_c канала пражњења	1000 Ω	1000 Ω	1000 Ω
Стуб вода	IEEE (4.15)	IEEE (4.15)	Комплексни
Уземљивач стуба	R_{const}	Јонизација	Јонизација
Прескок на изолатору	LPM	V-t	LPM



Слика 4.8 – Минимална струја атмосферског пражњења која узрокује повратни прескок на 110 kV и 220 kV воду у случају пражњења у врх стуба



Слика 4.9 – Минимална струја атмосферског пражњења која узрокује повратни прескок на 110 kV и 220 kV воду у случају пражњења у средину распона

Кумулативни утицај различитих модела елемената на прорачунату минималну амплитуду струје атмосферског пражњења која може да изазове испад вода из погона је веома изражен. Постоје велика расипања добијених резултата. Разлике између екстремних вриједности су у неким случајевима веће од 2 пута, тј. веће од 100%. Овај резултат је од великог значаја и публикован је у [141]. Због свега наведеног неопходно је веома пажљиво одабрати моделе елемената који ће се користити приликом креирања еквивалентних електричних шема вода. Експерименталну верификацију модела елемената је веома тешко урадити. У ту сврху би се морала користити тригерована атмосферска пражњења у водове и морали би се прецизно дефинисати сви параметри система који су битни за прорачуне. Многе од тих параметара није једноставно мјерити, а ни моделовати.

4.8. Оптимални модели елемената

Модели елемената који се користе у инжењерској пракси треба истовремено да буду и једноставни за употребу и довољно тачни за репрезентовање стварне појаве. Ови захтјеви су противурјечни тако да је потребно наћи компромисе. На

основу анализе која је приказана у овом поглављу, као и у [141],[149],[150],[158], могу се предложити оптимални модели елемената за прорачуне минималних амплитуда струја пражњења које у случају директних атмосферских пражњења у воде изазивају њихове испаде из погона. Оптимални модели елемената, који ће се користити у прорачунима у поглављима 5 и 6, су:

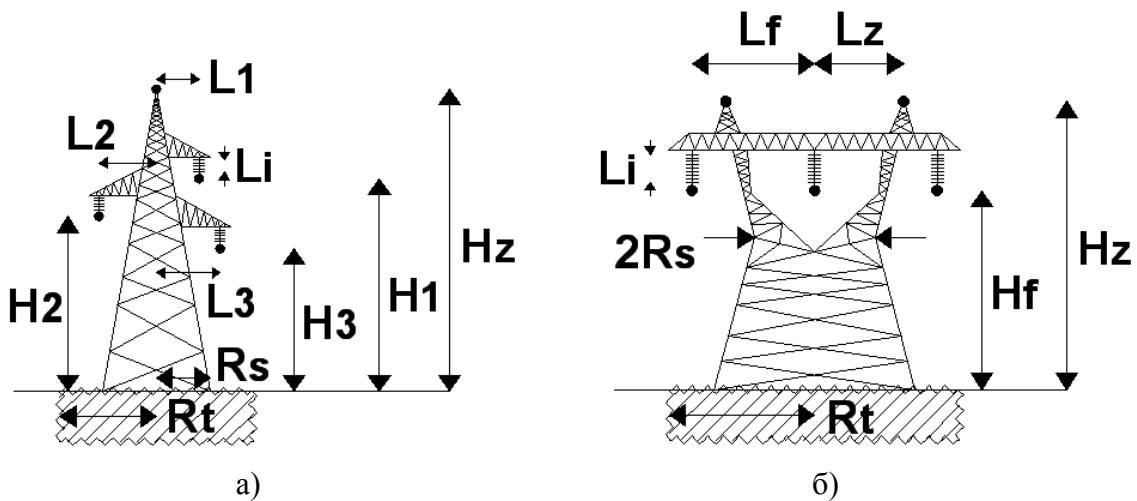
1. Вриједност карактеристичне импедансе канала атмосферског пражњења нема утицај на резултате прорачуна. Предлаже се вриједност од 1000 Ω .
2. Таласни облик струје атмосферског пражњења се треба моделовати примјеном троугаоног таласа јер је истовремено и довољно тачан и довољно једноставан за примјену.
3. Модел стуба надземног вода нема значајнији утицај на резултате прорачуна. Предлаже се IEEE модел, изрази (4.15) и (4.16).
4. Уземљивач стуба треба да се моделује уважавајући појаву јонизације тла.
5. Прескок на ваздушној изолацији вода треба моделовати примјеном методе прогресивног лидера.
6. Заштитно, земљоводно и затезно уже, као и фазни проводници, се у инжењерској пракси могу моделовати примјеном једноставних модела базираних на карактеристичној импеданси ужета и брзини простирања таласа која је једнака брзини свјетлости. Фреквенцијски зависан прорачун параметара ужади се треба користити када се желе моделовати електромагнетне спреге између ужади. Ово је поготово од интереса у случају примјене више заштитних и земљоводних ужади. Ради униформности у даљим прорачунима ће се користити фреквенцијски зависан модел вода.
7. Радни напон треба да се моделује примјеном идеалног напонског извора. Усваја се максимална вриједност напона на једној од фаза, са поларитетом супротним од поларитета атмосферског пренапона.
8. Линијски одводници пренапона се требају моделовати преко $U-I$ нелинеарне карактеристике коју обезбјеђује произвођач, а која је добијена примјеном ударног струјног таласа облика $8/20 \mu\text{s}/\mu\text{s}$.

Предложени модели елемената су оптимални за прорачуне који се врше у овом раду. Ако се, нпр, жели одредити таласни облик пренапона на конзоли стуба који

највјерније одговара пренапону на реалном воду морају се одредити други оптимални модели елемената. Једноставнији начин је да се користе најсложенији модели елемената јер би они требали да имају највећу тачност за ту врсту прорачуна. Наиме, сложени модели елемената су најчешће извођени под условом да се прорачунати таласни облици пренапона у одређеним тачкама система подударају са резултатима експерименталних мјерења.

5. Ефикасност стандардних и специјалних система заштите надземних водова од атмосферских пренапона

Ефикасност стандардних и специјалних система заштите дистрибутивних и преносних надземних водова од атмосферских пренапона је рачуната примјеном нумеричких прорачуна у програмском пакету ЕМТР-АТР. Прорачун је урађен за 10 kV и 35 kV дистрибутивне водове, односно за 110 kV и 220 kV преносне водове. За 10 kV, 35 kV и 110 kV системе су усвојени стубови са вертикалним распоредом проводника, слика 5.1 а), а за 220 kV систем су усвојени стубови са хоризонталним распоредом проводника, слика 5.1 б).



Слика 5.1 – а) Стуб са вертикалним распоредом проводника (10, 35 и 110 kV) и б) стуб са хоризонталним распоредом проводника (220 kV)

У прорачунима су кориштени модели елемената који су дефинисани у поглављу 4.8, а који су побројани и у табели 5.1. Подаци о атмосферским пражњењима су приказани у табели 5.2, а преузети су из [183],[184]. Улазни подаци за прорачуне су дати у табели 5.3. Ознаке из табеле 5.3 су дефинисане на слици 5.1. Усвојене су типичне вриједности које су преузете из [185]-[188], а подаци о димензијама 110 kV и 220 kV стубова су преузети из документације Електромреже Србије (ЕМС-а) која је кориштена и приликом израде студије [21].

Табела 5.1 – Основни модели елемената за прорачуне

Елемент	Модел
Таласни облик струје пражњења	Троугаони, 5,6/77 $\mu\text{s}/\mu\text{s}$ [183]
Карактеристична импеданса канала грома	1000 Ω
Модел стуба	IEEE модел, (4.15) и (4.16)
Модел уземљивача стуба	Јонизациони модел
Модел прескока на ваздушној изолацији	LPM метода
Модел затезних ужади	550 Ω , 300 m/ μs
Модел фазних, заштитних и земљоводних ужади	Фреквенцијски зависан JMarti модел (LCC)
Модел линијских одводника пренапона	$U-I$ карактеристика
У сваком прорачуну се усваја најкритичнија вриједност радног напона.	

Табела 5.2 – Основни параметри пражњења [183],[184]

Параметри негативних пражњења према Бергеру [184] (број регистрованих узорака)	Вјероватноћа превазилажења вриједности		
	95%	50%	5%
Амплитуда струје (101)	14 kA	30 kA	80 kA
Укупно наелектрисање (94)	1,3 C	7,5 C	40 C
Вријеме чеља (89)	1,8 μs	5,5 μs	18 μs
Вријеме зачеља (90)	30 μs	75 μs	200 μs
Параметри позитивних пражњења према Бергеру [184] (број регистрованих узорака)	Вјероватноћа превазилажења вриједности		
	95%	50%	5%
Амплитуда струје (26)	4,6 kA	35 kA	250 kA
Укупно наелектрисање (26)	20 C	80 C	350 C
Вријеме чеља (19)	3,5 μs	22 μs	200 μs
Вријеме зачеља (16)	25 μs	230 μs	2000 μs
Постоји значајно варирање параметара атмосферских пражњења у различитим областима, нпр. средња вриједност амплитуде струје првог негативног пражњења је 30 kA у Швајцарској, 29 kA у Јапану, али 45 kA у Бразилу [183].			

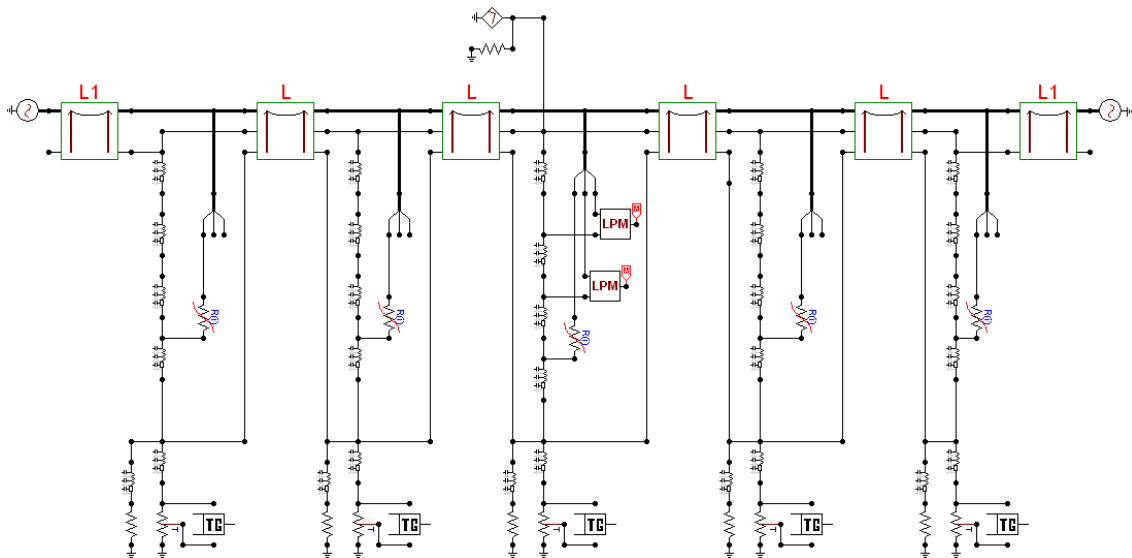
Табела 5.3 – Основни улазни подаци о водовима

Параметар	Вриједност			
	10 kV	35 kV	110 kV	220 kV
Висина стуба (H _z) [m]	13	15	25	30
Висина проводника (H ₁ -H ₂ -H ₃) [m]	11,5-10,6-9,8	13-11,5-9,5	20-18-16	23,5
Угиб проводника [m]	3	3,5	8	11
Угиб заштитног ужета [m]	2	2,5	6	8
Полупречник основе стуба (R _s) [m]	0,6	0,8	2	4
Полупречник уземљивача (R _t) [m]	1,6	2	4	8
Међуелектродно растојање изолаторског ланца (L _i) [m]	0,22	0,44	0,96	1,65
Растојање проводника од осе стуба [m]	(L ₁ -L ₂ -L ₃) 0,4-0,6-0,6	(L ₁ -L ₂ -L ₃) 0,95-1,2-1,5	(L ₁ -L ₂ -L ₃) 2,7-3,1-3,5	(L _f -L _z) 9,5-7,7
Растојање заштитно уже проводник у распону [m]	2,55	3,2	8,1	9,7
Полупречник проводника и заштитног ужета [mm]	4,05 3	6,8 3	8,6 4,75	15,3 5,5
DC* отпорност проводника и заштитног ужета [Ω /km]	0,835 5,5	0,306 5,5	0,194 3,55	0,059 2,79
Дужина распона [m]	120	180	250	300
Карактеристична импеданса стуба [Ω]	205	195	173	123
Дужина крајњих водова	6 km			

*DC (скраћеница од енглеског израза Direct Current), означава једносмјерну струју

Једна од општих замјенских електричних шема надземног вода која је креирана у програмском пакету ЕМТР-АТР је приказана на слици 5.2. Шема се односи на случај пражњења у врх стуба вода са заштитним, земљоводним и затезним ужетом, који има постављене линијске одводнике пренапона у доњој

фази. На основу ове замјенске шеме могуће је креирати замјенске шеме за све друге случајеве који ће се у раду анализирати. Број стубова који се користе у еквивалентним шемама је пет за случај пражњења у врх стуба, односно шест за случај пражњења у средину распона. То значи да еквивалентне шеме имају два додатна распона у односу на шеме са слике 4.1. Повећавањем броја распона у шемама је избјегнут могући утицај броја анализираних распона на резултате прорачуна, поготово у случају дистрибутивних водова који имају краће распоне. У случају вода без заштитног ужета усвојене су исте висине фазних проводника као у случају вода са заштитним ужетом. Специфична електрична отпорност тла је рачуната кориштењем формуле (4.22), а на основу задате отпорности распрострања уземљивача и његових димензија.

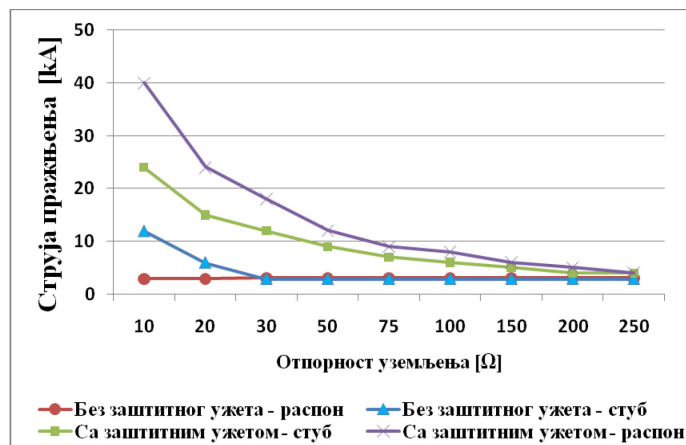


Слика 5.2 – Еквивалентна шема система за прорачуне која је креирана у програмском пакету EMTP-ATP

5.1. Заштита дистрибутивног 10 kV вода

Дистрибутивни 10 kV водови су веома угрожени од атмосферских пренапона због ниског подносивог напона изолације. Минималне прорачунате амплитуде струја пражњења које узрокује испад 10 kV вода из погона су приказане на слици 5.3. Прорачун је рађен за различите вриједности отпорности уземљења стубова, различита мјеста пражњења на воду и за случај када је вод са и без заштитног ужета. На воду без заштитног ужета практично свако пражњење у фазне проводнике изазива испад вода из погона. У случају директног пражњења у фазни проводник вода отпорност уземљења стубова нема утицај на резултате

прорачуна јер је струја пражњења галвански одвојена од уземљивача стуба до тренутка појаве прескока. Уградњом заштитног ужета вјероватноћа појаве испада вода се смањује, поготово у случају када стубови имају малу отпорност распрострањања (нпр. 10 Ω). Ефикасност заштитног ужета је много већа у случају пражњења у средину распона вода јер се у том случају знатно мањи дио струје пражњења одводи кроз стуб вода и његов уземљивач тако да је и пораст напона на изолаторском ланцу знатно мањи. У прорачунима су усвојени 10 kV изолатори типа U70BL који имају подносиви напон изолације од 100 kV, а не изолатори типа U40BL који имају подносиви напон изолације од 70 kV. Примјеном изолатора типа U40BL добили би се још неповољнији резултати. У случају када отпорност распрострањања уземљивача има средњу или велику вриједност, заштитно уже на 10 kV воду постаје потпуно неефикасно.



Слика 5.3 – Утицај заштитног ужета и мјеста пражњења на воду на минималну амплитуду струје која узрокује испад 10 kV вода из погона

У циљу побољшања перформанси надземних 10 kV водова са становишта заштите од атмосферских пражњења могу се користити различити специјални системи заштите. Прва опција је да се одговарајући ниво заштите покуша остварити примјеном додатног ужета. Оно може да се постави или на врху стуба као додатно заштитно уже, или испод фазних проводника као земљоводно уже. Усвојено је да се земљоводна ужад постављају 2,5 m испод доњег фазног проводника тј. на висини од 7,3 m изнад тла. Ако се користи једно земљоводно уже, оно се фиксира директно за стуб. У случају примјене два заштитна или два земљоводна ужета она се постављају на међусобној удаљености од 1,5 m тј. на конзолама дужине 0,75 m. Ефикасност заштите расте са повећањем растојања

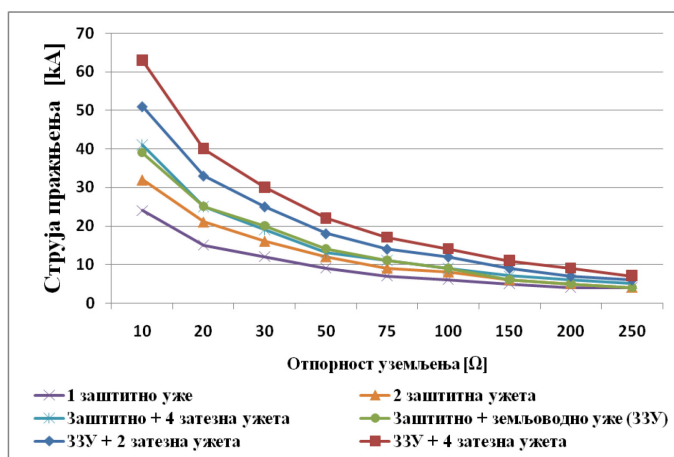
између ужади. Максимална удаљеност је ограничена механичким напрезањима стуба, носећих конзола, ширином трасе вода и слично. Благим повећањем растојања између ужади са 1,5 m на 2 m није могуће поправити перформансе заштите.

Побољшање перформанси критичног 10 kV вода се може остварити и уградњом затезних ужади на стубовима. У циљу повећања ефикасности затезних ужади боље је да се она фиксирају што је могуће височије на стубу. Максимална висина је једнака висини вјешања земљоводне ужади, тј. 7,3 m. Фиксирањем ужади на већу висину нарушила би се минимална потребна изолациона растојања према фазним проводницима. Претпоставка је да се затезна ужад постављају под углом од 45° у односу на стуб вода. У том случају дужина им је једнака $7,3/\cos(45^{\circ})\approx 10$ m. Сљедећа претпоставка је да су димензије уземљивача затезне ужади четири пута мање од димензија уземљивача стуба, па је самим тим и њихова отпорност распростирања четири пута већа. С обзиром да се са затезних ужади одводе знатно мање струје него са главног уземљивача стуба, занемарена је могућност појаве јонизације тла у њиховој околини. Када се користи више затезних ужади сматра се да су везана паралелно па се еквивалентна импеданса ужета (550Ω) и еквивалентна отпорност распростирања уземљивача смањују пропорционално броју ужади.

Прорачуната ефикасност наведених специјалних система заштите је графички приказана на слици 5.4. Увођењем додатних специјалних система заштите минимална амплитуда струје пражњења која узрокује испад вода из погона се повећава, поготово у случају мале отпорности уземљења стубова. Важно је примјетити да се већи квалитет заштите постиже у случају примјене заштитног и земљоводног ужета, него у случају примјене два заштитна ужета. Додатна предност прве опције је што земљоводно уже, због ниже тачке вјешања, мање механички напреже стуб и његов темељ у поређењу са заштитним ужетом. Утврђено је да систем заштите базиран на примјени два земљоводна ужета има исту ефикасност као систем заштите који је реализован примјеном једног земљоводног ужета тако да је уградња другог земљоводног ужета на 10 kV воду потпуно неефикасна. Систем заштите базиран на примјени једног земљоводног ужета има приближно исту ефикасност као систем заштите реализован примјеном

четири затезна ужета на сваком стубу. Најбољи квалитет заштите се добија истовременом примјеном заштитних, земљоводних и затезних ужади. Уградњом већег броја затезних ужади ефикасност заштите расте, али се због њиховог међусобног екранирања не препоручује више од четири ужета, поглавље 3.3.

Заједнички проблем за све анализирани специјалне системе заштите је што њихова ефикасност изразито опада са порастом вриједности отпорности уземљења стубова. При врло високим вриједностима отпорности уземљења стубова ови системи заштите постају потпуно неефикасни.



Слика 5.4 – Утицај заштитних, земљоводних и затезних ужади на минималну амплитуду струје пражњења која узрокује испад 10 kV вода из погона

5.1.1. Примјена линијских одводника пренапона на 10 kV воду

Комбинована примјена стандардних и специјалних система заштите не може обезбједити ефикасну заштиту од директних атмосферских пражњења за 10 kV вод који има велику отпорност уземљења стубова. Квалитетна заштита таквих водова од директних атмосферских пражњења се може обезбједити једино примјеном линијских одводника пренапона. У прорачунима су кориштени одводници пренапона произвођача АВВ. Избор линијских одводника пренапона је урађен у складу са упутством произвођача [189] у коме пише да у изолованим дистрибутивним мрежама трајни радни напон одводника треба бити једнак максималном привременом пренапону. Препоручује се усвајање и сигурносне резерве од 10% због могућег пораста напона усљед дјеловања виших хармоника, недостатка регулације напона и слично. Коначно, минимални трајни радни напон U_c одводника пренапона је једнак $1,1 \times U_S = 13,2 \text{ kV}$, гдје је U_S максимална

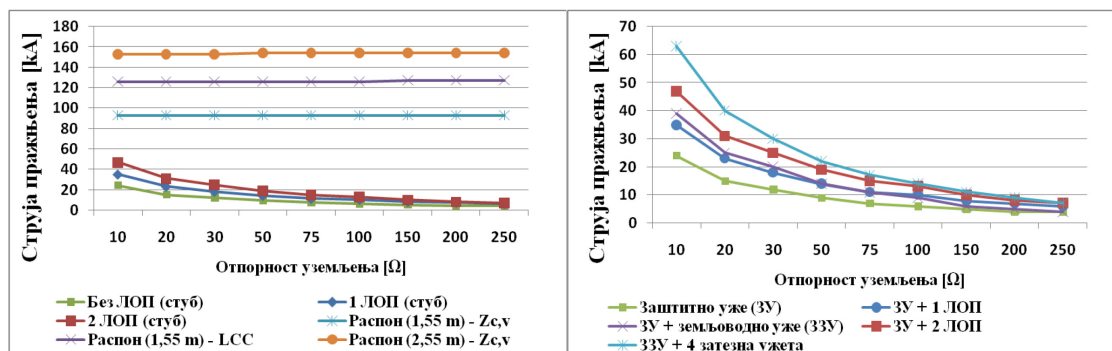
вриједност трајног радног линијског напона (максимални фазни привремени пренапон) и за 10 kV систем износи 12 kV. Из табеле произвођача се бирају одводници пренапона са првим вишим трајним радним напоном који у овом случају износи 14 kV [190]. Ови одводници пренапона имају називни напон U_r од 17,5 kV. Њихова нелинеарна $U-I$ карактеристика је дата у табели 5.4 [190]. Вриједност преосталог напона одводника при струји одвођења од 0,1 mA је добијена линеарном екстраполацијом, како је објашњено у поглављу 4.6. Анализирана је примјена одводника пренапона типа POLIM-S..N који имају енергетску класу одвођења 3, односно могу апсорбовати максималну енергију од 9 kJ/kV_(U_c) тј. 126 kJ [190].

Табела 5.4 – $U-I$ карактеристика одводника пренапона типа POLIM-S..N називног напона 17,5 kV добијена ударним струјним таласом облика 8/20 $\mu\text{s}/\mu\text{s}$ [190]

Струја одвођења	Преостали напон
0,1 mA	35,2 kV
1 kA	36,5 kV
2,5 kA	38,4 kV
5 kA	40,1 kV
10 kA	42,0 kV
20 kA	46,4 kV

Прорачуни су рађени са претпоставком да је конфигурација линијских одводника пренапона на свих пет анализираних стубова иста. Вод је снабђевен заштитним ужетом. Добијени резултати су приказани на слици 5.5 а). На слици 5.5 б) је приказано поређење ефикасности различитих специјалних система заштите 10 kV вода.

Примјеном једног или два линијска одводника по фази може се постићи побољшање ефикасности заштите само у случају мале вриједности отпорности уземљења стубова, слика 5.5 а). У супротном, ефикасност заштите је веома ниска. Уградњом линијских одводника пренапона у све три фазе и на сваком стубу вода вјероватноћа прескока на изолаторским ланцима постаје једнака нули. У том случају могуће је једино да се догоди прескок у распону вода, у случају када се атмосферско пражњење догоди у заштитно уже између два стуба [111].



а)

б)

Слика 5.5 – а) Утицај линијских одводника пренапона на минималну амплитуду струје пражњења која узрокује испад 10 kV вода из погона и б) поређење ефикасност различитих специјалних система заштите 10 kV вода

Струје пражњења, које узрокују појаву прескока у распону вода, су доста велике и приказане су на слици 5.5 а). Основни разлог за то је дуго растојање заштитно уже–фазни проводник. Ово растојање на стубу анализираниог 10 kV вода износи 1,55 m, а у распону 2,55 m јер је угиб фазног проводника 1 m дужи од угиба заштитног ужета. Прорачуни су урађени за случај када се постојање угиба ужади уважава, али и у случају када се постојање угиба занемари. Показано је да различите вриједности угиба ужади имају велики утицај на минималне прорачунате амплитуде струја квара. Присуство линијских одводника пренапона, који ограничавају максималну вриједност пренапона на воду, такође веома утиче на смањење вјероватноће појаве прескока у распону вода. Минимална амплитуда струје пражњења која узрокује прескок у распону вода је независна од вриједности отпорности земљења стубова, а зависи од дужине распона и дужине међуелектродног растојања [141]. Прорачуне вриједности струја су доста зависне и од примјењеног модела вода. У случају примјене LCC модела вода минималне амплитуде струја квара су знатно више јер се на фазним проводницима индукују напони истог поларитета као што је атмосферски пренапон. Ови индуковани напони су посљедица уважавања утицаја електромагнетних спрега између ужади. Индуковани напони на фазним проводницима смањују потенцијалну разлику између заштитног ужета и фазног проводника па је потребна већа струја пражњења да изазове прескок. У случају једноставног модела вода ($Z_{c,v}$), који је кориштен у поглављу 4, утицај електромагнетних спрега је занемарен тако да је струја квара знатно нижа, али је и даље доста висока, слика 5.5 а).

Што се тиче ефикасности различитих система заштите, слика 5.5 б), важно је примјетити да се приближно иста ефикасност заштите добија примјеном линијског одводника пренапона у доњој фази вода и уградњом земљоводног ужета. У суштини, линијски одводник пренапона омогућава штићеном фазном проводнику да се у случају појаве атмосферских пренапона понаша као земљоводно уже. При томе је ефикасност земљоводног ужета нешто већа јер се струја пражњења одводи и за релативно мале вриједности пренапона. Заштита базирана на примјени два линијска одводника пренапона по стубу вода има приближно исту ефикасност као заштита базирана на примјени заштитног, земљоводног и четири затезна ужета по стубу вода. Примјеном три линијска одводника пренапона по сваком стубу могућност појаве испада вода из погона се практично елиминише.

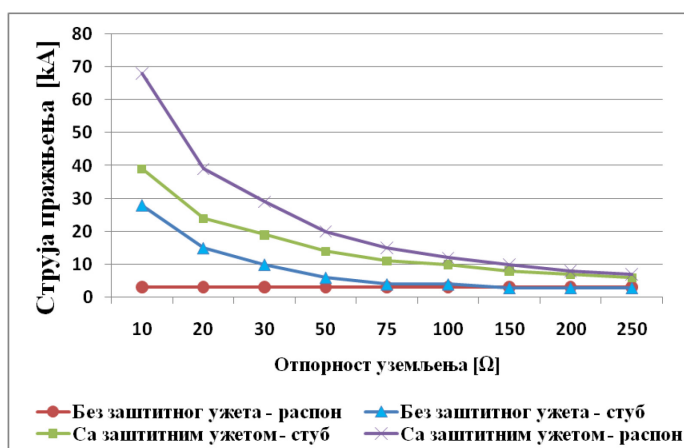
Најефикаснија заштита критичног 10 kV вода који је изграђен на тлу велике специфичне електричне отпорности и у области са израженом грмљавинском активношћу се може реализовати примјеном линијских одводника пренапона постављених у свим фазама и на сваком стубу вода. При томе се мора водити рачуна да изолациона растојања између заштитног ужета и фазних проводника буду довољно дуга како би се вјероватноћа појаве прескока у распону вода свела на најмању могућу мјеру. Енергетско напрезање линијских одводника пренапона је у овом случају знатно смањено, уз услов да је вод снабдјевен заштитним ужетом. Разлог томе је што сви линијски одводници пренапона који се налазе на стубовима у околини мјеста пражњења расподјељују енергију пражњења тако да је енергетско напрезање појединачног одводника знатно редуковано.

5.2. Заштита дистрибутивног 35 kV вода

Дистрибутивни 35 kV водови су слабије угрожени од атмосферских пренапона у односу на 10 kV водове због вишег подносивог напона изолације. Ипак, њихов подносиви напон изолације је далеко од довољног за једноставно пројектовање ефикасне заштите. Сви прорачуни у овом и у сљедећим поглављима су рађени по аналогији са претходним поглављем тако да ће се избјегавати понављање општих теоријских објашњења.

Минималне прорачунате амплитуде струја пражњења које узрокују испаде 35 kV вода из погона су приказане на слици 5.6. Прорачун је рађен за различите

вриједности отпорности уземљења стубова, различита мјеста пражњења на воду и за случај када је вод са и без заштитног ужета. На воду без заштитног ужета практично свако директно атмосферско пражњење изазива испад вода из погона. Изузетак је случај пражњења у стуб вода који имају ниску отпорност уземљења (нпр. $\leq 10 \Omega$). У том случају око 50% пражњења изазива испад вода из погона. Уградњом заштитног ужета вјероватноћа испада вода се смањује, поготово у случају када стубови имају малу отпорност уземљења. У случају вода са великом вриједношћу отпорности уземљења стубова ефикасност заштитног ужета је веома ниска.

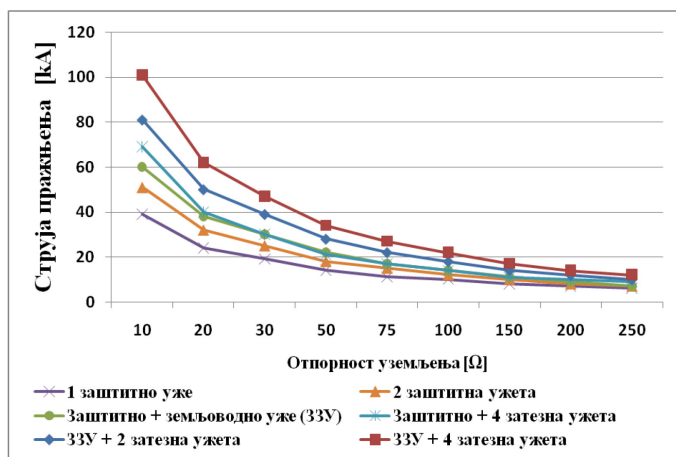


Слика 5.6 – Утицај заштитног ужета и мјеста пражњења на минималну амплитуду струје која узрокује испад 35 kV вода из погона

У циљу побољшања перформанси надземних 35 kV водова могу се користити различити специјални системи заштите као што су уградња додатног заштитног или земљоводног ужета, или уградња затезних ужади. Земљоводна ужад се постављају 3,5 m испод доње конзоле тј. на висини од 6,4 m изнад тла. Ако се користи једно земљоводно уже, оно се фиксира директно за стуб. У случају примјене два заштитна или два земљоводна ужета она се постављају на међусобној удаљености од 2 m, тј. на конзолама дужине 1 m. У случају примјене затезних ужади, максимална висина на коју се она могу фиксирати је одређена минималним потребним изолационим растојањима према фазним проводницима и једнака је висини вјешања земљоводне ужади тј. 6,4 m. Претпостављена дужина земљоводне ужади је 10 m. Усвојено је да појединачни уземљивачи затезних ужади имају четири пута веће димензија (четири пута већу отпорност распрострањања) од уземљивача стубова. Због малих амплитуда струја које се

одводе са уземљивача затезних ужади занемарена је могућност појаве јонизације тла у њиховој околини.

Ефикасност примјене наведених специјалних система заштите је графички приказана на слици 5.7. Увођењем специјалних система заштите минимална амплитуда струје пражњења која узрокује испад вода из погона се повећава, поготово у случају мале отпорности уземљења стубова. И у овом случају важе исти закључци као код 10 kV вода. Додатно уже има већу ефикасност ако се угради као земљоводно, него ако се угради као друго заштитно уже. Уградњом другог земљоводног ужета не постиже се побољшање перформанси заштите. Систем заштите базиран на примјени једног земљоводног ужета има приближно исту ефикасност као систем заштите реализован примјеном четири затезна ужета на сваком стубу. Најбољи квалитет заштите се добија истовременом примјеном заштитних, земљоводних и затезних ужади. Уградњом већег броја затезних ужади ефикасност заштите расте. Ипак, и у случају 35 kV вода, упркос повећаном подносивом напону изолације у односу на 10 kV вод, ефикасност заштите изразито опада са повећањем отпорности уземљења стубова и при врло високим вриједностима отпорностима уземљења стубова сви анализирани системи заштите постају недовољно ефикасни.



Слика 5.7 – Утицај заштитних, земљоводних и затезних ужади на минималну амплитуду струје пражњења која узрокује испад 35 kV вода из погона

5.2.1. Примјена линијских одводника пренапона на 35 kV воду

Комбинована примјена стандардних и специјалних система заштите не може обезбједити висок ниво заштите 35 kV вода који има велику отпорност уземљења

стубова. Квалитетна заштита таквих вода од директних атмосферских пражњења се може обезбједити једино примјеном линијских одводника пренапона. У прорачунима су кориштени линијски одводници пренапона произвођача АВВ. Избор одводника пренапона је урађен у складу са упутством произвођача [189], а процедура избора је описана у поглављу 5.1.1. Минимални трајни радни напон U_c одводника пренапона је једнак $1,1 \times U_S = 41,8 \text{ kV}$, гдје је U_S максимална вриједност трајног радног линијског напона (максимални фазни привремени пренапон) и за 35 kV систем износи 38 kV. Из табеле произвођача се бирају одводници пренапона са првим вишим трајним радним напоном који у овом случају износи 42 kV [191]. Ови одводници пренапона имају називни напон U_r од 52,5 kV. Њихова нелинеарна $U-I$ карактеристика је дата у табели 5.5 [191]. Вриједност преосталог напона одводника при струји одвођења од 0,1 mA је добијена линеарном екстраполацијом, како је објашњено у поглављу 4.6. Анализирана је примјена одводника пренапона типа POLIM-I..N који имају енергетску класу одвођења 2, односно могу апсорбовати максималну енергију од 5,5 kJ/kV(U_c) тј. 231 kJ [191].

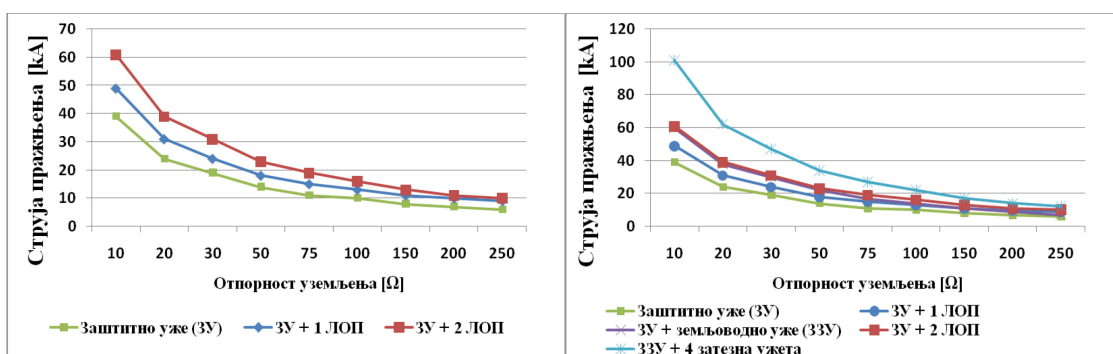
Табела 5.5 – $U-I$ карактеристика одводника пренапона типа POLIM-I..N називног напона 52,5 kV добијена ударним струјним таласом облика 8/20 $\mu\text{s}/\mu\text{s}$ [191]

Струја одвођења	Преостали напон
0,1 mA	105,4 kV
1 kA	109,7 kV
2,5 kA	116,1 kV
5 kA	121,8 kV
10 kA	129,0 kV
20 kA	147,1 kV

Прорачуни су рађени са претпоставком да је конфигурација линијских одводника пренапона на свих пет анализираних стубова иста. Вод је снабђевен заштитним ужетом. Добијени резултати су приказани на слици 5.8 а). На слици 5.8 б) је приказано поређење ефикасности различитих специјалних система заштите 35 kV вода.

И у овом случају парцијална уградња линијских одводника пренапона резултује побољшањем ефикасности заштите само у случају када вод има малу вриједност отпорности уземљења стубова, слика 5.8 а). Уградњом два линијска одводника пренапона у доње двије фазе вода добија се приближно иста ефикасност заштите као и уградњом земљоводног ужета, слика 5.8 б). То значи да земљоводно уже на 35 kV воду има осјетно бољу ефикасност него на 10 kV воду. Разлог томе је виши подносиви напон изолације вода услед кога вод може да поднесе више пренапоне. Самим тим земљоводно уже има више времена да одводи струју пражњења и снижава пренапоне.

Анализирани системи заштите не могу обезбједити ефикасну заштиту воду који је грађен на тлу велике специфичне електричне отпорности и у области са израженом грмљавинском активношћу. Ефикасна заштита таквих водова се мора базирати на примјени линијских одводника пренапона који се уграђују у све три фазе и на сваком стубу вода на критичном дијелу трасе. У том случају прескок се може десити једино у распону вода. Минималне амплитуде струја пражњења које узрокују појаву прескока у распону вода износе око 161 kA и рачунате су уважавајући постојање угиба ужади и примјеном LCC модела вода. Анализирани дистрибутивни 35 kV вод је заштићен од прескока у распону због постојања дугог растојања заштитно уже–фазни проводник од 3,2 m, али и због постојања великог броја линијских одводника пренапона који знатно ограничавају максималне пренапоне на воду.



а)

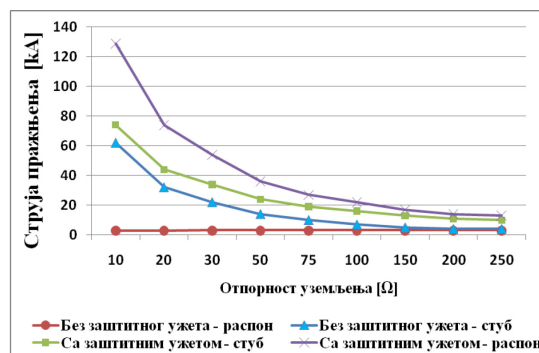
б)

Слика 5.8 – а) Утицај линијских одводника пренапона на минималну амплитуду струје пражњења која узрокује испад 35 kV вода из погона и б) поређење ефикасност различитих специјалних система заштите 35 kV вода

5.3. Заштита преносног 110 kV вода

Преносни надземни водови су знатно боље заштићени од атмосферских пренапона у односу на дистрибутивне водове јер имају знатно виши подносиви напон изолације. Ипак, преносни водови су најчешће и много важнији за ЕЕС и за потрошаче у поређењу са дистрибутивним водовима тако да је и толерисани годишњи број њихових испада из погона знатно мањи. На простору бивше Југославије најнижи називни напон преносних водова износи 110 kV. Истовремено, 110 kV мрежа је и најгушћа услед чега постоји одређени број критичних водова, а на појединим је реализован неки од специјалних система заштите.

Прорачуни у овом поглављу су рађени по аналогији са претходним поглављима тако да ће се избјегавати понављање општих теоријских објашњења. Минималне прорачунате амплитуде струја пражњења које узрокују испад 110 kV вода из погона су приказане на слици 5.9. Прорачун је рађен за различите вриједности отпорности уземљења стубова, различита мјеста пражњења на воду и за случај када је вод са и без заштитног ужета. Практично свако пражњење у распон 110 kV вода без заштитног ужета изазива његов испад из погона. У случају пражњења у врх стуба вода без заштитног ужета који има малу отпорност уземљења вјероватноћа појаве прескока је знатно смањена због високог подносивног напона изолације 110 kV вода. Уградњом заштитног ужета вјероватноћа појаве испада вода из погона се знатно смањује, поготово у случају када стубови вода имају малу отпорност уземљења. Са порастом отпорности уземљења стубова ефикасност заштитног ужета значајно опада и у случају великих вриједности постаје изузетно ниска.

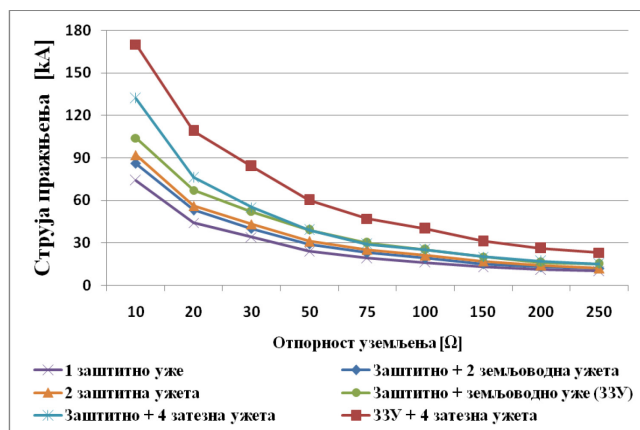


Слика 5.9 – Утицај заштитног ужета и мјеста пражњења на минималну амплитуду струје која узрокује испад 110 kV вода из погона

У циљу побољшања перформанси критичних 110 kV водава могу се користити различити специјални системи заштите као што су уградња додатног заштитног или земљоводног ужета, или уградња затезних ужади. У случају примјене два заштитна ужета претпоставка је да се она постављају на међусобној удаљености од 3 m тј. на конзолама дужине 1,5 m. Земљоводна ужад се постављају 5 m испод доње конзоле тј. на висини од 12 m изнад тла. Ако се користи једно земљоводно уже оно се фиксира у оси стуба. У случају примјене два земљоводна ужета претпоставка је да се она постављају на спољашњост конструкције стуба и на међусобној удаљености од 3 m, а ова удаљеност може да се повећа примјеном посебних носећих конзола. У случају примјене затезних ужади, максимална висина на коју се она могу фиксирати је одређена минималним потребним изолационим растојањима према фазним проводницима. Усвојено је да се затезна ужад фиксирају на висини од 12 m, а претпостављена дужина им је 17 m. Претпостављено је да појединачни уземљивачи затезних ужади имају четири пута веће димензија (четири пута већу отпорност распростирања) од уземљивача стубова. Занемарена је могућност појаве јонизације тла у околини уземљивача затезних ужади због ниских амплитуда струја које се са њих одводе.

Ефикасност примјене наведених специјалних система заштите је графички приказана на слици 5.10. Добијени резултати су аналогни са резултатима за 35 kV вод. Увођењем специјалних система заштите минимална амплитуда струје пражњења која узрокује испад вода из погона се повећава, поготово у случају мале вриједности отпорности уземљења стубова. Додатно уже има већу ефикасност ако се угради као земљоводно, него ако се угради као друго заштитно уже. Уградњом другог земљоводног ужета добија се слабија ефикасност заштите у односу на систем заштите базиран на примјени додатног заштитног ужета или једног земљоводног ужета, иако је укупан број ужади повећан са два на три. Ово се може тумачити међусобном екранизацијом земљоводних ужади услед чега долази до смањења њиховог укупног заштитног дејства. Систем заштите базиран на примјени једног земљоводног ужета има приближно исту ефикасност као систем заштите реализован примјеном четири затезна ужета на сваком стубу. Најбољи квалитет заштите се добија истовременом примјеном заштитних, земљоводних и затезних ужади. Ипак, упркос повећаном подносивом напону

изолације 110 kV вода у односу на дистрибутивне водове, ефикасност специјалних система заштите изразито опада са повећањем отпорности уземљења стубова. При врло високим вриједностима отпорности уземљења стубова сви анализирани системи заштите имају ниску ефикасност.



Слика 5.10 – Утицај заштитних, земљоводних и затезних ужаци на минималну амплитуду струје пражњења која узрокује испад 110 kV вода из погона

5.3.1. Примјена линијских одводника пренапона на 110 kV воду

Комбинована примјена стандардних и специјалних система заштите може обезбједити висок ниво заштите умјерено угроженим 110 kV водовима. Ипак, у случају када је отпорност уземљења стубова екстремно висока или када се захтјева изузетно висок квалитет заштите, најбоље је да се заштита базира на примјени линијских одводника пренапона. У прорачунима су кориштени линијски одводници пренапона произвођача АВВ. Избор одводника пренапона је урађен у складу са упутством произвођача [192]. За директно уземљене мреже у којима је вријеме искључења квара једнако 1 s минимални називни напон U_r одводника пренапона је једнак $0,72 \times U_{max} = 88,6 \text{ kV}$, гдје је U_{max} максимална вриједност трајног радног напона и за 110 kV систем износи 123 kV. Из табеле произвођача се по правилу бирају одводници пренапона са првим вишим називним напоном који у овом случају износи 90 kV [192]. Због честе појаве високих привремених пренапона, због дужег времена искључења водова и других фактора у Босни и Херцеговини се у 110 kV мрежи деценијама користе одводници пренапона називног напона 96 kV. Распадом Југославије дошло је до битног нарушавања напонских прилика у ЕЕС-у БиХ [193]. У периоду од 01.01. 2010. до 30.06.2010. године (4344 сата) регистроване су сатне вриједности напона на сабирницама

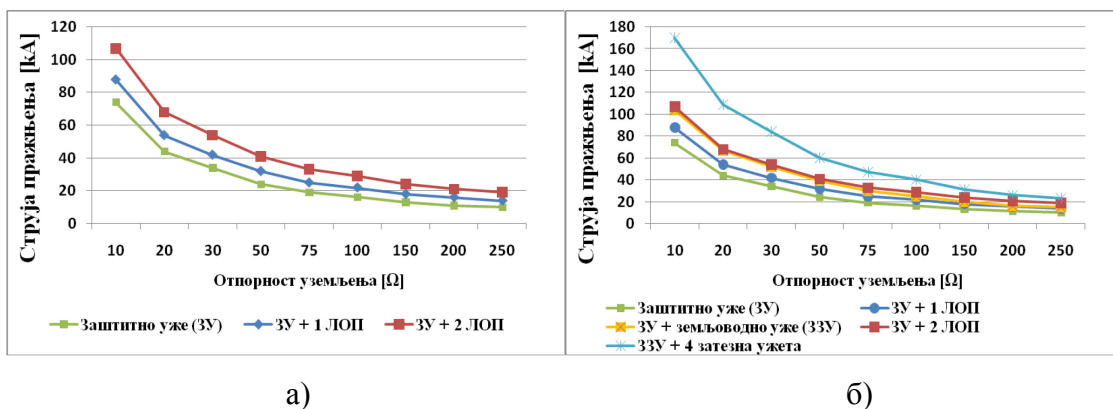
сљедећих 110 kV постројења: ТС Бања Лука 6, ТС Мостар 4, ТС Приједор 2, ТС Сарајево 10, ТС Требиње, ТС Тузла и ТЕ Какањ. Напони већи од максимално дозвољених су регистровани у четири постројења и то у ТС Мостар 4 (3% времена или 112 h), ТС Сарајево 10 (3% времена или 128 h), ТС Требиње (2% времена или 88 h) и ТЕ Какањ (13% времена или 582 h) [193]. Због овога би било оправдано да се на 110 kV водове уграде линијски одводници пренапона називног напона већег од 96 kV. У Хрватској су на 110 kV водовима кориштени линијски одводници пренапона називног напона 108 kV и енергетске класе 2 [20]. У овом случају су такође усвојени линијски одводници пренапона називног напона 108 kV. Њихова нелинеарна $U-I$ карактеристика је дата у табели 5.6 [192]. Вриједност преосталог напона одводника при струји одвођења од 0,1 mA је добијена линеарном екстраполацијом, како је објашњено у поглављу 4.6. Анализирана је примјена одводника пренапона типа PEXLIM-R..Y који имају енергетску класу одвођења 2, односно могу апсорбовати максималну енергију од $5,1 \text{ kJ/kV}_{(U_r)}$ тј. 550,8 kJ [192].

Табела 5.6 – $U-I$ карактеристика одводника пренапона типа PEXLIM-R..Y називног напона 108 kV добијена ударним струјним таласом облика $8/20 \mu\text{s}/\mu\text{s}$ [192]

Струја	Преостали напон
0,1 mA	248 kV
5 kA	264 kV
10 kA	280 kV
20 kA	314 kV
40 kA	359 kV

Прорачуни су рађени са претпоставком да је конфигурација линијских одводника пренапона на свих пет анализираних стубова иста. Вод је снабдјевен заштитним ужетом. Добијени резултати су приказани на слици 5.11 а). На слици 5.11 б) је дато поређење ефикасности различитих специјалних система заштите 110 kV вода. Добијени резултати су аналогни са онима за 35 kV вод. Парцијална уградња линијских одводника пренапона на 110 kV воду је ефикасна само у случају када вод има малу вриједност отпорности уземљења стубова, слика 5.11 а). Уградњом два линијска одводника пренапона у доње двије фазе

вода добија се приближно иста ефикасност заштите као и уградњом земљоводног ужета, слика 5.11 б). Ипак, анализирани системи заштите не могу обезбједити високо ефикасну заштиту воду који је грађен на тлу веома велике специфичне електричне отпорности и у области са израженом грмљавинском активношћу. Ефикасна заштита таквих водова се мора базирати на примјени линијских одводника пренапона у све три фазе и на сваком стубу вода на критичном дијелу трасе. У том случају прескок се може десити једино у распону вода, али је вјероватноћа појаве таквог сценарија занемарљиво мала због дугог растојања заштитно уже–фазни проводник (8,1 m) и због постојања линијских одводника пренапона који ограничавају максималне пренапоне на вода.



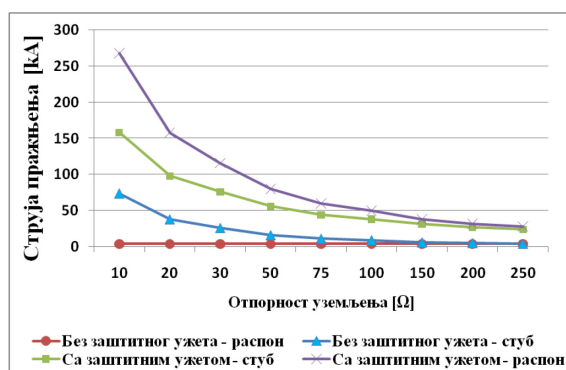
Слика 5.11 – а) Утицај линијских одводника пренапона на минималну амплитуду струје пражњења која узрокује испад 110 kV вода из погона и б) поређење ефикасност различитих специјалних система заштите 110 kV вода

5.4. Заштита преносног 220 kV вода

Преносни надземни водови називног напона 220 kV су, због свог високог подносивог напона изолације, веома добро заштићени од атмосферских пренапона. Ипак, дешава се да неки од њих имају неприхватљиво велики број испада узрокованих атмосферским пражњењима у заштитну ужад.

Сви прорачуни у овом поглављу су рађени по аналогији са претходним поглављима тако да ће се избјегавати понављање општих теоријских објашњења. Веома битна разлика у односу на претходно анализирани случајеве је што је усвојено да 220 kV вод има хоризонтални распоред фазних проводника тако да се модел стуба вода разликује од модела приказаног на слици 5.2. У овом случају примјењен је модел стуба вода који се може наћи у [194],[195]. Минималне

прорачунате амплитуде струја пражњења које узрокују испад 220 kV вода из погона су приказане на слици 5.12. Прорачун је рађен за различите вриједности отпорности уземљења стубова, различита мјеста пражњења на воду и за случај када је вод без и са два заштитна ужета. Практично свако пражњење у распон вода без заштитног ужета изазива његов испад из погона. У случају пражњења у врх стуба вода без заштитног ужета који има малу отпорност уземљења вјероватноћа појаве прескока је доста смањена због високог подносивног напона изолације 220 kV вода. Уградњом два заштитна ужета вјероватноћа испада вода се значајно смањује, поготово у случају када стубови вода имају малу отпорност уземљења. Са порастом отпорности уземљења стубова ефикасност заштитних ужади опада и у случају веома великих вриједности постаје приближно једнака 50%.



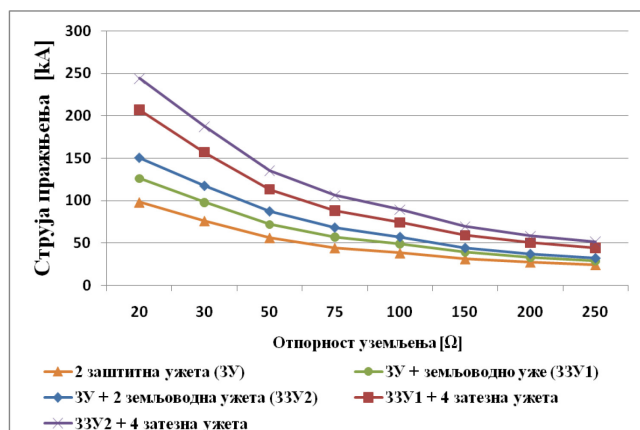
Слика 5.12 – Утицај заштитног ужета и мјеста пражњења на минималну амплитуду струје која узрокује испад 220 kV вода из погона

У циљу побољшања перформанси критичних 220 kV водова могу се користити различити специјални системи заштите као што су уградња додатних земљоводних или затезних ужади. Земљоводна ужад се постављају 8,5 m испод фазних проводника, односно на висини од 15 m изнад тла. Ако се користи једно земљоводно уже, оно се фиксира у оси стуба. У случају примјене два земљоводна ужета она се постављају на међусобној удаљености од 8 m тј. фиксирају се на спољашњост конструкције стуба. У случају примјене затезних ужади, максимална висина на коју се она могу фиксирати је одређена минималним потребним изолационим растојањима према фазним проводницима. Усвојено је да се затезна ужад фиксирају на висини од 15 m, а њихова дужина је усвојена да износи 21 m. Претпостављено је да појединачни уземљивачи затезних ужади имају четири пута веће димензија (четири пута већу отпорност распростирања) од уземљивача

стубова. Занемарена је могућност појаве јонизације тла у околини уземљивача затезних ужади због малих амплитуда струја које се са њих одводе.

Ефикасност примјене наведених специјалних система заштите је графички приказана на слици 5.13. Увођењем специјалних система заштите минимална амплитуда струје пражњења која узрокује испад вода из погона се знатно повећава, поготово у случају мале отпорности уземљења стубова. Квалитет заштите се осјетно побољшава и додавањем другог земљоводног ужета што на водовима нижих називних напона није био случај. Додавање другог земљоводног ужета је ефикасно и у случају примјене затезних ужади.

Вод називног напона 220 kV са два заштитна ужета изграђен на тлу изузетно велике специфичне електричне отпорности (нпр. преко 10000 Ωm) и са отпорношћу распрострања уземљивача од око 250 Ω (такви водови постоје у Херцеговини, БиХ) имају минималну струју квара од 24 kA. Примјеном једног земљоводног ужета минимална струја квара у истим условима расте на 29 kA, док се уградњом четири затезна ужета по стубу струја квара повећава на 44 kA. Најбољи квалитет заштите се добија са два земљоводна ужета и четири затезна ужета по стубу. У овом случају струја квара износи 51 kA, а вјероватноћа испада са мреже тако штићеног вода је веома мала.



Слика 5.13 – Утицај примјене заштитних, земљоводних и затезних ужади на амплитуду струје пражњења која узрокује испад 220 kV вода из погона

5.4.1. Примјена линијских одводника пренапона на 220 kV воду

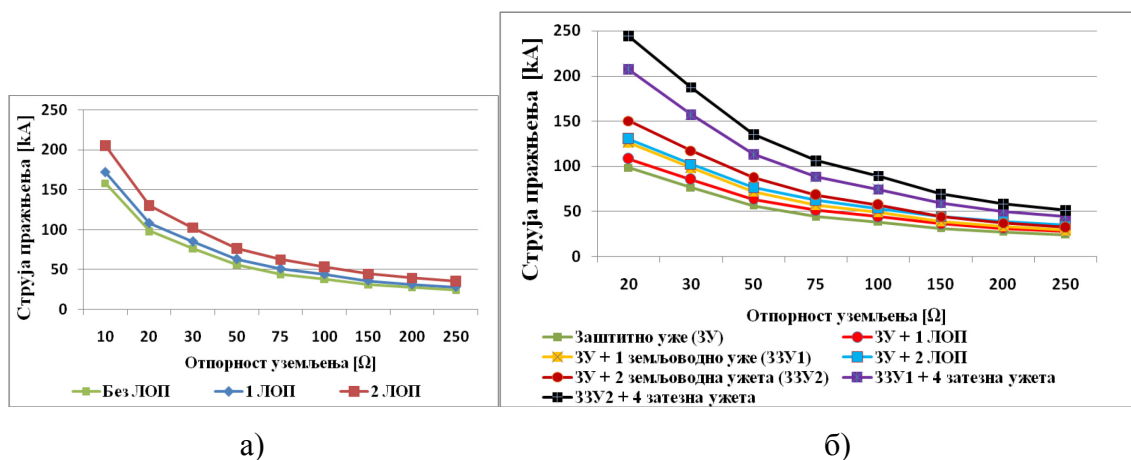
Комбинована примјена стандардних и специјалних система заштите може обезбједити висок квалитет заштите 220 kV вода од атмосферских пренапона чак и у случајевима када стубови вода имају велику отпорност уземљења. Ипак,

реализација такве заштите је доста сложена јер се базира на примјени већег броја додатних ужади, тј. једног или два земљоводна ужета и четири затезна ужета по стубу. У овом поглављу је показано да се квалитетна заштита критичног 220 kV вода од директних атмосферских пражњења може обезбједити и парцијалном примјеном линијских одводника пренапона. У највећем броју случајева ово рјешење ће бити и имплементирано због једноставнијег процеса реализације. У прорачунима су кориштени линијски одводници пренапона произвођача АВВ. Избор одводника пренапона је урађен у складу са упутством произвођача [192]. За директно уземљене мреже у којима је вријеме искључења квара једнако 1 s минимални називни напон U_r одводника пренапона је једнак $0,72 \times U_{max} = 176,4 \text{ kV}$, гдје је U_{max} максимална вриједност трајног радног напона и за 220 kV систем износи 245 kV. Из табеле произвођача се по правилу бирају одводници пренапона са првим вишим називним напоном који у овом случају износи 180 kV [192]. Како је у претходном поглављу 5.3.1 наведено, распадом Југославије дошло је до битног нарушавања напонских прилика у ЕЕС-у БиХ [193]. У периоду од 01.01. 2010. до 30.06.2010. године (4344 сата) регистроване су сатне вриједности напона на сабирницама сљедећих 220 kV постројења: ТС Мостар 4, ТС Приједор 2, ТС Требиње и ТС Тузла. Напон већи од максималног дозвољеног је регистрован у четири постројења и то у ТС Мостар 4 (6% времена или 251 h), ТС Приједор 2 (32% времена или 1369 h), ТС Требиње (2% времена или 95 h) и ТС Тузла (23% времена или 989 h) [193]. Због тога, али и због дужег времена искључења водова и других фактора предлаже се усвајање одводника са вишим називним напоном од 180 kV, а то су одводници са називним напоном од 192 kV или 198 kV. У овом случају, као и у случају 110 kV вода, усвојена је већа сигурносна резерва, тј. одводници са називним напоном од 198 kV. Нелинеарна $U-I$ карактеристика овог одводника пренапона је дата у табели 5.7 [192]. Вриједност преосталог напона при струји одводника од 0,1 mA је добијена линеарном екстраполацијом, како је објашњено у поглављу 4.6. Анализирана је примјена одводника пренапона типа PEXLIM Q који имају енергетску класу одвођења 3, односно могу апсорбовати максималну енергију од $7,8 \text{ kJ/kV}_{(U_r)}$ тј. 1544,4 kJ [192]. PEXLIM одводници пренапона енергетске класе 2 за 220 kV систем нису у понуди у брошурама произвођача.

Табела 5.7 – $U-I$ карактеристика одводника пренапона типа PEXLIM Q називног напона 198 kV добијена ударним струјним таласом облика 8/20 $\mu\text{s}/\mu\text{s}$ [192]

Струја	Преостали напон
0,1 mA	420 kV
5 kA	443 kV
10 kA	466 kV
20 kA	512 kV
40 kA	573 kV

Прорачуни су рађени са претпоставком да је конфигурација линијских одводника пренапона на свих пет анализираних стубова иста. Вод је снабђевен са два заштитна ужета. Када се користи један линијски одводник пренапона он се уграђује у средњу фазу вода, а када се користе два линијска одводника пренапона они уграђују се у спољашње фазе вода. Добијени резултати су приказани на слици 5.14 а). На слици 5.14 б) је приказано поређење ефикасности различитих специјалних система заштите 220 kV вода.



Слика 5.14 – а) Утицај линијских одводника пренапона на минималну амплитуду струје пражњења која узрокује испад 220 kV вода из погона и б) поређење ефикасност различитих специјалних система заштите 220 kV вода

Парцијална уградња линијских одводника пренапона на 220 kV воду незнатно побољшава квалитет заштите вода, слика 5.14 а). Показује се да је осјетно ефикасније примјенити једно земљоводно уже него уграђивати један линијски одводник пренапона по стубу вода, слика 5.14 б). Уградњом два линијска одводника пренапона по стубу вода добија се незнатно бољи квалитет заштите у

односу на уградњу једног земљоводног ужета. Систем заштите који је базиран на примјени два земљоводна ужета има знатно бољу ефикасност у поређењу са системом заштите који се базира на примјени два линијска одводника пренапона по стубу вода, слика 5.14 б). Употребом четири затезна ужета по сваком стубу штићеног дијела трасе осјетно се побољшава квалитет заштите вода. Систем заштите базиран на примјени једног земљоводног и четири затезна ужета има већу ефикасност у односу на систем заштите који се базира на примјени два земљоводна ужета. Ако се желе у потпуности елиминисати испади вода који су узроковани атмосферским пражњењима у заштитно уже вода, потребно је користити линијске одводнике пренапона у све три фазе вода. У том случају прескок се теоријски може десити једино у распону вода, али је вјероватноћа појаве таквог сценарија занемарљиво мала због дугог растојања заштитно уже–фазни проводник (9,7 m) као и због постојања линијских одводника пренапона који знатно ограничавају максималне пренапоне на воду.

5.5. Дискусија резултата нумеричких прорачуна

На бази приказаних резултата нумеричких прорачуна, али и на бази теоријских анализа из поглавља 2 и 3, могуће је извести генералне закључке о ефикасности различитих стандардних и специјалних система заштите надземних дистрибутивних (10 kV и 35 kV) и преносних (110 kV и 220 kV) водова од атмосферских пренапона:

1. Практично свако директно атмосферско пражњење у фазне проводнике вода, независно од његовог називног напона тј. подносивог напона изолације, изазива испад вода са мреже.
2. Пражњење у стуб вода без заштитног ужета изазива испаде у случају када је отпорност уземљења стубова велика. Са смањењем отпорности уземљења стубова вјероватноћа појаве прескока опада, поготово код водова са високим подносивим напоном изолације.
3. Уградња заштитног ужета веома побољшава квалитет заштите вода од директних атмосферских пражњења. У комбинацији са ниском отпорношћу уземљења стубова и високим подносивим напоном изолације вода може се постићи висок квалитет заштите.

4. Ефикасност примјене заштитних ужади изразито опада са порастом отпорности уземљења стубова и са смањењем подносивог напона изолације вода. При великим вриједностима отпорности уземљења стубова заштитно уже има ниску ефикасност чак и на преносним водовима.
5. Примјеном специјалних система заштите могуће је знатно побољшати квалитет заштите водова који имају ниску или умјерену отпорност уземљења стубова.
6. Са порастом отпорности уземљења стубова ефикасност специјалних система заштите изражено опада.
7. На водовима свих називних напона додатно уже је ефикасније уградити као земљоводно него као друго заштитно уже.
8. Два земљоводна ужета се могу користити за побољшање ефикасности заштите 220 kV водова. На водовима називних напона 10 kV, 20 kV и 110 kV друго земљоводно уже је неефикасно.
9. Већи број затезних ужади осигурава бољи квалитет заштите вода. Предлаже се употреба максимално 4 затезна ужета.
10. Употребом заштитног, земљоводног и четири затезна ужета по стубу постиже се изузетно висок квалитет заштите вода који има ниску или умјерену отпорност уземљења стубова.
11. Уградња земљоводног ужета је ефикаснија од уградње једног линијског одводника пренапона по стубу вода, а за 20 kV, 110 kV и 220 kV водове приближно је једнако ефикасна као уградња два линијска одводника пренапона по стубу. Ипак, линијски одводници пренапона спречавају појаву прескока на штићеним фазама и смањују вјероватноћу појаве прескока на нештићеним фазама вода. Земљоводно уже само смањује вјероватноћу појаве прескока на свим фазама вода, поготово на доњим.
12. Најефикаснији начин заштите надземног вода од атмосферских пренапона је уградња линијских одводника пренапона у све фазе и на сваком стубу штићеног дијела трасе вода. У овом случају се број испада вода узрокованих атмосферским пренапонима може свести на нулу.
13. Исподи из погона вода који је штићен линијским одводницима пренапона на сваком стубу и у свакој фази се може догодити само у случају када

долази до уништења линијског одводника пренапона или када се догоди прескок у распону вода.

14. Вјероватноћа појаве прескока у распону вода се може свести на занемарљиво малу вриједност избором одговарајућих изолационих растојања између ужади.

Уништење линијског одводника пренапона се може десити због дјеловања различитих фактора, а најзначајнији су механичка и термичка напрезања. У овом раду нису приказана прорачуната енергетска напрезања линијских одводника пренапона, иако је урађен велики број прорачуна. Први и основни разлог је тај што добијени резултати веома зависе од броја распона у еквивалентној шеми вода што значи да и удаљени стубови имају осјетан утицај на резултате прорачуна. Утицај удаљених стубова расте са порастом отпорности уземљења стубова. Прорачунато енергетско напрезање линијских одводника на погођеном стубу веома зависи и од броја линијских одводника пренапона који су уграђени на воду. Због тога се у анализи мора знати тачна конфигурација линијских одводника на воду, тј. број штићених стубова и распоред линијских одводника пренапона на њима. Прорачуната енергија веома зависи и од усвојених параметара атмосферског пражњења (трајање чела и зачеља таласа, амплитуда тј. укупна количина наелектрисања и слично). На бази урађених прорачуна, као и на бази теоријских анализа из поглавља 3 и резултата других аутора [23],[33],[58],[108]-[113],[130] могу се дати сљедећи корисни коментари:

1. Појава термичког уништења линијских одводника пренапона на воду са заштитним ужетом је врло мало вјероватна. Препоручује се примјена линијских одводника пренапона енергетске класе 2 или 3.
2. На воду без заштитног ужета треба да се користе линијски одводници пренапона веће енергетске класе, минимум 3, а пожељно је и 4, мада се и у том случају може десити велики број термичких уништења уређаја.
3. Енергетско напрезање линијских одводника пренапона се најефикасније смањује примјеном заштитног ужета.
4. Уградњу линијских одводника пренапона у паралели треба избјегавати јер ефикасност оваквог начина заштите није експериментално доказана [111].

5. Енергетско напрезање линијских одводника пренапона на преносним водовима је релативно мало, док на дистрибутивним водовима могу да се појаве критични случајеви. То се углавном дешава на водовима нижих називних напона који немају заштитно уже, а који се штите малим бројем линијских одводника пренапона.
6. Проблем повећаног броја отказа линијских одводника пренапона на воду са заштитним ужетом се може ријешити уградњом земљоводног ужета. Овај проблем се може догодити на једнофазним дистрибутивним водовима са екстремно великом отпорношћу уземљења стубова, на водови који су изложени дјеловању позитивних атмосферских пражњења и слично.
7. Енергетско напрезање линијских одводника пренапона је много мање у поређењу са енергетским напрезањем стандардних одводника пренапона у постројењу. Разлог томе је што су одводници у постројењу директно везани на уземљивач постројења који има малу отпорност распростирања. Насупрот томе, линијски одводници пренапона су везани за фазни проводник вода који својом импедансом знатно ограничава струју кроз одводник усљед чега се знатно смањује и њихово енергетско напрезање.

6. Екстерни систем заштите надземних водова

Сви до сад описани и примјењени системи заштите надземних водова од атмосферских пренапона се базирају на претпоставци да је директно атмосферско пражњење у вод неминовно, а системима заштите се жели спријечити појава испада вода из погона. С тога се може рећи да постојећи системи заштите штите вод од атмосферских пренапона, али не и од атмосферских пражњења. У овом поглављу се анализира нови концепт заштите надземних водова који је назван екстерни систем заштите, а чија је намјена да штити вод од директних атмосферских пражњења.

6.1. Постојећи екстерни системи заштите

Различите врсте екстерних система заштите се одавно користе за екранирање веома битних и веома осјетљивих објеката од директних атмосферских пражњења. Шесто поглавље књиге [196] је посвећено овом систему заштите и његовим примјенама. У њему је наведено да је екстерни систем заштите намјењен да спријечи појаву директних атмосферских пражњења у штићени објекат, да сигурно проведе струју пражњења до тла и да обезбједи њено одвођење у тло. Ова три циља се остварују примјеном три међусобно повезана система: прихватни систем атмосферског пражњења, спусни проводници и уземљивач. У многим случајевима екстерни систем заштите је директно везан на штићени објекат, осим у случајевима када топлотни, звучни, пренапонски и други ефекти атмосферског пражњења могу да изазову оштећења објекта или његовог садржаја.

У [196] су приказане четири шеме екстерних система заштите лансирних рампи на космодромима широм свијета. Оне се односе на космодроме John F. Kennedy и Cape Canaveral који се налази у САД, али и на космодроме који се налазе у Русији, Јапану, Кини, Индији и Француској Гвајани. У неким случајевима заштита је реализована примјеном торњева и штапних хваталки, док су у неким случајевима додатно кориштена и екстерна заштитна ужад.

Екстерни систем заштите се често користи и за заштиту складишта муниције, као и за заштиту складишта експлозивних средстава и различитих врста горива. На слици 6.1 је приказан екстерни систем заштите складишта водоника у ТЕ Станари (РС-БиХ). Исти систем заштите је примјењен и за заштиту складишта

мазута. Екстерна заштита је реализована примјеном четири стуба од којих су два која се налазе на дужој ивици објекта повезана громобранским ужадима.



Слика 6.1 – Фотографија екстерног система заштите складишта водоника у ТЕ Станари (РС-БиХ)

Екстерни систем заштите се користи и за екранирање соларних панела у великим соларним електранама од директних атмосферских пражњења, слика 6.2 [197]. Овај систем заштите је нашао примјену и у случају других угрожених објеката. На слици 6.3 [198] је приказан екстерни систем заштите експерименталне станице за изучавање микроорганизама.



Слика 6.2 – Заштита соларних електрана од директних атмосферских пражњења примјеном екстерног система заштите [197]

(ознаке: 1–изолациони одстојник, 2–бетонски темељ, 3–штапна хваталка)

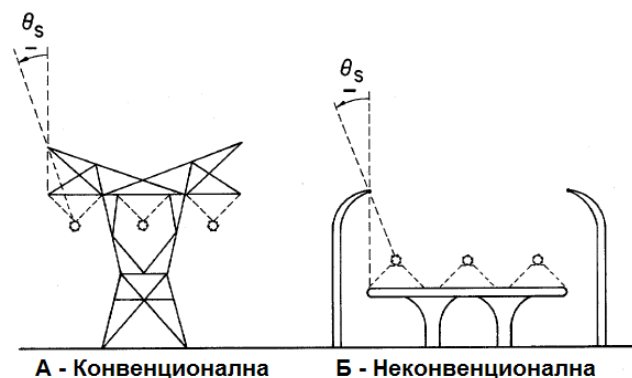


Слика 6.3 – Заштита експерименталне станице за изучавање микроорганизама примјеном екстерног система заштите [198]

6.2. Екстерни систем заштите надземних преносних водова

У претходном поглављу су наведени примјери екстерног система заштите објеката од директних атмосферских пражњења. Ипак, у јавно доступној литератури се не могу пронаћи подаци о примјени екстерног система заштите на надземним водовима.

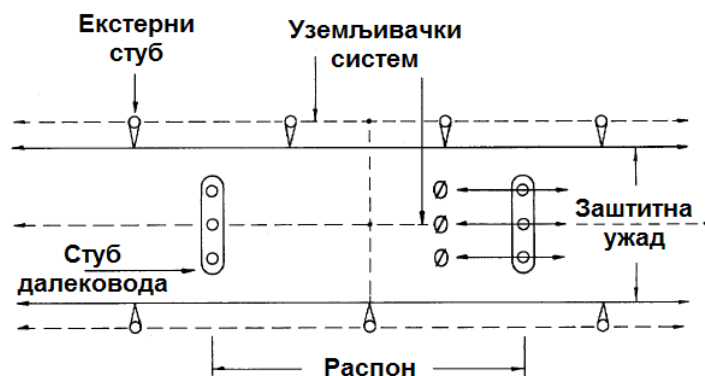
Могућност примјене екстерног система заштите на надземним преносним водовима је први пут споменута 1975. године у раду [177] који је публикован у часопису *Electra* број 41. Оригинални графички приказ предложеног екстерног система заштите је дат на слици 6.4 [177]. Заштита је названа неконвенционалном. При томе је наглашено да заштиту неконвенционалном не чини негативан заштитни угао јер он постоји и на многим двосистемским водовима са вертикалним распоредом фазних проводника који имају два заштитна ужа. Предложена заштита је неконвенционална зато што постоје одвојени стубови за заштитну ужад и за фазне проводнике. Овакав начин заштите омогућава кориштење нижих стубова приликом изградње надземног вода. Самим тим се и фазни проводници вода вјешају на мању висину чиме се смањују механичка напрезања стубова и темеља вода.



Слика 6.4 – Могући начини конструкције надземних преносних водова

А – Конвенционална конструкција и Б – Неконвенционална конструкција [177]

У истом раду је приказана и слика 6.5 која представља тлоцрт на неконвенционални надземни преносни вод. Екстерни стубови су помјерени у односу на стубове штићеног вода како би се повећала међуелектродна растојања између уземљивача два система и између њихових стубова. Екстерни уземљивачки систем је димензионисан за екстремне услове, тј. када тло на коме се вод гради има велику специфичну електричну отпорност. Димензионисање уземљивача је урађено са циљем да се минимизују електромагнетне спреге између заштитних ужади, уземљивача штићеног вода и екстерних стубова.



Слика 6.5 – Тлоцрт неконвенционалног система заштите надземног вода [177]

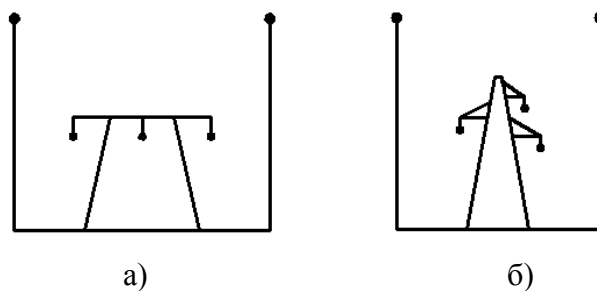
Приказана анализа екстерног система заштите која је преузета из [177] је доста површна. Аутори нису детаљније анализирали овај систем заштите него су само приказали нову идеју и нови приступ заштити надземних водова који би накнадно могао детаљније да се разради. Након овог рада нису се појављивале нове публикације о екстерном систему заштите надземних водова па се може рећи да је идеја прошла незапажено, али и да није било потребе да се она практично имплементира. Ипак, иако овај систем заштите није накнадно анализиран и

детаљније разрађиван, идеја није потпуно заборављена. Екстерни систем заштите надземних преносних водова се помиње под тачком 8.3 у још увијек важећем IEEE стандарду 1243 из 1997. године [22]. Поглавље 8. поменутог стандарда се односи на специјалне системе заштите надземних преносних водова од атмосферских пренапона. Тачка 8.3 носи назив „Заштитна ужад на одвојеним стубовима“ и садржи само 7 редова чији је превод дат у наставку [22]:

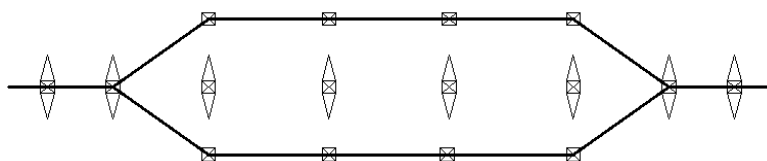
„Заштитна ужад, умјесто да се постављају на исте стубове који носе и фазне проводнике, могу да се поставе на одвојене стубове. Оваква конфигурација може да обезбједи изузетно велики негативан заштитни угао, који смањује индуктивне губитке на воду и који обезбјеђује ефикасну заштиту вода од директних пражњења у фазне проводнике. Примјеном овог система заштите може се смањити и потребна висина стубова вода, па самим тим и њихово механичко напрезање усљед вјетра. Иако је ово рјешење скупо, оно може да обезбједи изузетне перформансе штићеног вода са аспекта заштите од атмосферских пражњења. Веза заштитних ужади са стубовима који носе фазне проводнике, која може бити потребна због затварања струја кратких спојева, може да се реализује примјеном дугачких веза које имају велику импедансу за струје атмосферских пражњења. Тиме би се смањила вјероватноћа појаве повратног прескока на штићеном воду усљед преношења струје атмосферског пражњења са екстерног система заштите.“

И у овом случају опис екстерног система заштите надземних преносних водова је доста штур и не приказује детаље у вези са начином димензионисања и конструкцијом заштите. Ипак, значај овог поглавља у оквиру стандарда [22] се огледа у чињеници да идеја о екстерном систему заштите надземних водова није заборављена.

Начин димензионисања екстерног система заштите преносних надземних водова је детаљно описан у [168]. То је једини јавно доступан научни рад у коме се детаљно анализира ова врста заштите. Нацрт екстерног система заштите преносних надземних водова са хоризонталним и вертикалним распоредом фазних проводника је дат на слици 6.6. Тлоцрт екстерног система заштите преносних надземних водова је приказан на слици 6.7. Представљен је случај када се екстерни стубови и стубови штићеног вода налазе у линији.



Слика 6.6 – Нацрт екстерног система заштите преносних надземних водова са а) хоризонталним и б) вертикалним распоредом проводника



Слика 6.7 – Глоцрт екстерног система заштите надземних водова

Вод који се штити екстерним системом заштите може да се димензионише на другачији начин у односу на стандардне надземне водове, а с циљем да се смање његове димензије и да се појефтини изградња. Екстерни систем заштите екранира вод од директних атмосферских пражњења тако да се на њему појављују једино индуковани напони који имају релативно малу амплитуду. У том случају димензионисање изолације се врши уважавајући напоне индустријске учестаности, склопне пренапоне и индуковане атмосферске напоне. Због тога је на штићеним водовима, на којима су атмосферски пренапони доминантни за димензионисање изолације, могуће смањити дужину изолационих растојања (дужина изолаторских ланаца, међуфазна растојања и слично). Такође, вод који се штити екстерним системом заштите не треба да има заштитно уже. Усљед постојања краћих изолационих растојања и смањене висине стубова могуће је остварити знатно компактнију конструкцију штићених водова.

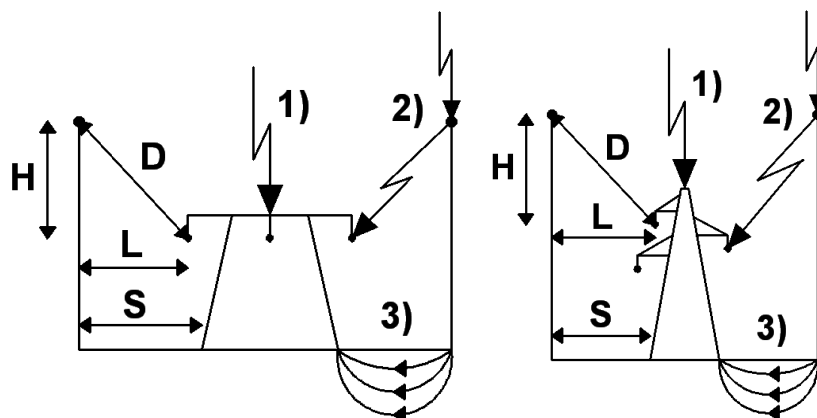
Димензионисање екстерног система заштите се врши уз услов да се задовоље два опречна захтјева:

1. Остваривање минималне вјероватноће продора скоковитог лидера до штићеног вода. Да би задовољио овај услов екстерни систем заштите треба бити постављен што је могуће ближе штићеном воду.
2. Остваривање минималне вјероватноће појаве прескока са екстерног система заштите према штићеном воду. Да би задовољио овај услов

екстерни систем заштите треба бити постављен што је могуће даље од штићеног вода.

Да би се оптимално задовољили наведени захтјеви морају се дефинисати критични догађаји који могу довести до појаве испада штићеног вода из погона. У случају примјене екстерног система заштите на преносним надземним водовима постоје три сценарија према којима се може догодити испад штићеног вода из погона усљед дјеловања атмосферских пражњења:

1. Директно атмосферско пражњење у штићени вод мимо екстерног система заштите, означено са 1) на слици 6.8.
2. Прескок са мјеста пражњења на екстерном систему заштите према фазном проводнику штићеног вода, означено са 2) на слици 6.8.
3. Прескок са уземљивача екстерног стуба према уземљивачу стуба штићеног вода, означено са 3) на слици 6.8.



Слика 6.8 – Три сценарија према којима се може догодити испад из погона штићеног надземног преносног вода

У циљу минимизације могућности појаве испада штићеног вода из погона усљед дјеловања атмосферских пражњења, морају се правилно димензионисати следећа четири растојања са слике 6.8:

D – растојање између екстерног заштитног ужета и фазног проводника штићеног вода. Ово растојање се димензионише тако да се минимизује могућност појаве прескока са екстерног заштитног ужета према фазном проводнику штићеног вода у случају када се пражњење одвија у екстерно заштитно уже.

L – растојање између екстерног стуба и фазног проводника штићеног вода.

Ово растојање се димензионише тако да се минимизује могућност појаве прескока са екстерног стуба према фазном проводнику штићеног вода у случају када се пражњење одвија у врх екстерног стуба.

H – висина екстерних заштитних ужади изнад фазних проводника штићеног вода. Ова висина се димензионише тако да се минимизује могућност продора скоковитог лидера до штићеног вода, а мимо екстерних ужади.

S – растојање између уземљивача екстерног стуба и уземљивача стуба штићеног вода. Ово растојање се димензионише тако да се минимизује могућност појаве прескока са уземљивача екстерног стуба према уземљивачу стуба штићеног вода у случају када се пражњење одвија у врх екстерног стуба.

У табели 6.1 су дати основни улазни подаци за прорачуне који су рађени у програмском пакету ЕМТР-АТР. Усвојени су типични подаци. Модели елемената који су кориштени у прорачунима су приказани у табели 6.2 [168].

Табела 6.1 – Основни улазни подаци за прорачуне

Висина екстерног стуба	30 m	Карактеристична импеданса стуба	150 Ω
Еквивалентни полупречник уземљивача стуба	5 m	Карактеристична импеданса заштитног ужета	550 Ω

Табела 6.2 – Основни модели елемената за прорачуне

Елемент	Модел
Таласни облик струје пражњења	Троугаони, 5,6/77 $\mu\text{s}/\mu\text{s}$
Карактеристична импеданса канала пражњења	1000 Ω
Модел стуба	IEEE модел, (4.15)
Модел уземљивача стуба	Јонизациони модел
Модел прескока на ваздушној изолацији	LPM метода
Модел заштитних ужади	550 Ω , 300 m/ μs
Радни напон и утицај електромагнетних спрега између ужади су занемарени.	
Оптималан број распона екстерног система заштите је приказан на слици 4.1.	

Избор оптималних модела је урађен у складу са закључцима презентованим у поглављу 4, тј. у подпоглављу 4.8. Постоје мале разлике у односу на моделе елемената који су примјењени у прорачунима у поглављу 5. Наиме, у поглављу 5 су моделовани и радни напон на штићеном воду, али и електромагнетне спреге између ужади. У овом поглављу то није урађено због сљедећих разлога:

1. Прорачун је знатно поједностављен, а добијени су општи резултати који се могу примјенити на било који преносни надземни вод. То значи да добијени резултати не зависе од карактеристика штићеног вода (напонски ниво, димензије, конфигурација фазних проводника, број система итд.).
2. Занемарењем радног напона штићеног вода и електромагнетних спрега између ужади није се нарушила тачност и поузданост резултата прорачуна, а добијени су незнатно критичнији резултати. Наиме, вриједност радног напона на критичној фази је случајна величина, а најкритичнија вриједност је максимална апсолутна вриједност са знаком супротним у односу на знак атмосферског пренапона. Амплитуда индукованих напона на фазним проводницима штићеног вода, у случају пражњења у екстерни систем заштите, ће бити испод 350 kV [199] због велике близине пражњења воду. Индуковани напони имају исти знак као и атмосферски пренапон тако да долази до одузимања вриједности радног и индукованог напона. Максимални фазни радни напони на 110 kV, 220 kV и 400 kV воду редом износе око 90 kV, 180 kV и 327 kV тако да ће утицај ундукованог напона, који смањује потребна изолациона растојања, бити доминантан у односу на вриједност радног напона.

6.2.1. Одређивање растојања између екстерних заштитних ужади и фазних проводника штићеног вода – D

Растојање D се димензионише са циљем да се минимизује могућност појаве прескока са екстерног заштитног ужета према фазном проводнику штићеног вода у случају када се атмосферско пражњење одвија у средину распона екстерног заштитног ужета. Претпоставка је да се прескок према штићеном воду развија са мјеста пражњења на екстерном заштитном ужету. Према [168], растојање D може да се моделује примјеном методе прогресивног лидера која је описана у поглављу 4.5.3. Овај закључак је донешен на бази детаљног изучавања различитих

модела прескока и њихових могућности примјене првенствено у зависности од таласног облика примјењеног пренапона и дужине међуелектродног растојања. Публикације које се баве овом проблематиком су [141],[149],[150],[158],[176].

Прорачунате вриједности растојања D за различите вриједности амплитуда струја атмосферских пражњења и за различите вриједности специфичне електричне отпорности тла су приказане у табели 6.3. При малим вриједностима растојања D мора се водити рачуна да се не наруше минимална потреба растојања која су прописана за склопне или привремене пренапоне. Вјероватноћа појаве атмосферског пражњења са струјом амплитуде I је рачуната примјеном израза (6.1) који је предложен у [45]:

$$P(I) = \frac{1}{1 + \left(\frac{I}{31}\right)^{2,6}} \quad (6.1)$$

гдје је: I – амплитуда струје пражњења [кА].

Табела 6.3 – Прорачунате вриједности растојања D

Амплитуда струје пражњења I [кА]		40	60	80	100	120					
Вјероватноћа појаве струје $P(I)$ [%] (6.1)		34,0	15,2	7,8	4,5	2,9					
ρ [Ωm]	R [Ω]	Дужина распона					Растојање D [m]				
1000	32	200 m					1,6	2,4	3,2	4,0	4,8
2500	80						2,3	3,4	4,3	5,1	5,9
5000	159						3,3	4,3	5,2	6,2	7,2
10000	318						4,2	5,5	6,8	8,0	9,2
1000	32	400 m					2,8	4,1	5,5	6,9	8,2
2500	80						3,3	5,0	6,4	7,7	9,1
5000	159						4,2	5,7	7,3	8,6	10,2
10000	318						5,1	6,9	8,6	10,3	11,9

6.2.2. Одређивање растојања између екстерног стуба и фазних проводника штићеног вода - L

Растојање L се димензионише тако да се минимизује могућност појаве прескока са екстерног стуба према фазном проводнику штићеног вода у случају када се атмосферско пражњење одвија у врх екстерног стуба. Прорачун растојања

L се врши исто као и прорачун растојања D , осим што се усваја да се пражњење одвија у врх екстерног стуба и да се прескок дешава са екстерног стуба према фазном проводнику штићеног вода. Прорачунате вриједности растојања L за различите вриједности амплитуда струја атмосферских пражњења и за различите вриједности специфичне електричне отпорности тла су приказане у табели 6.4. При малим вриједностима растојања L мора се водити рачуна да се не наруше минимална потреба растојања која су прописана за склопне или привремене пренапоне.

Табела 6.4 – Прорачунате вриједности растојања L

Амплитуда струје пражњења I [kA]		40	60	80	100	120		
Вјероватноћа појаве струје $P(I)$ [%] (6.1)		34,0	15,2	7,8	4,5	2,9		
ρ [Ωm]	R [Ω]	Дужина распона		Растојање L [m]				
1000	32	200 m		1,2	1,8	2,4	2,7	3,0
2500	80			2,1	2,8	3,3	3,9	4,6
5000	159			2,8	3,9	4,7	5,5	6,2
10000	318			3,9	5,1	6,3	7,3	8,3
1000	32	400 m		1,5	2,3	3,0	3,1	3,4
2500	80			2,7	3,2	3,9	4,7	5,4
5000	159			3,3	4,5	5,6	6,5	7,4
10000	318			4,5	6,1	7,5	8,7	9,9

6.2.3. Одређивање растојање између уземљивача екстерног стуба и уземљивача стуба штићеног вода - S

Растојање S се димензионише тако да се минимизује могућност појаве прескока са уземљивача екстерног стуба према уземљивачу стуба штићеног вода у случају када се атмосферско пражњење одвија у екстерни стуб. У случају пражњења у екстерни стуб на његовим уземљивачким електродама се појављују веома високи напони који стварају јако електрично поље у тлу у околини електрода. Ако је јачина електричног поља на површини уземљивачких електрода већа од критичне доћи ће до формирања искри по површини и у унутрашњости тла. У том случају постоји могућност да искре које се развијају са уземљивача

екстерног стуба доспију до уземљивача стуба штићеног вода. На тај начин долази до преношења атмосферских пренапона са екстерног система заштите на штићени вод услед чега може доћи до појаве повратног прескока на воду. Да би се вјероватноћа појаве овог сценарија свела на најмању могућу мјеру потребно је осигурати довољно растојање S између уземљивача екстерних стубова и уземљивача штићеног вода.

Највећи дио струје атмосферског пражњења се у околно тло одводи са уземљивача екстерног стуба у који се десило атмосферско пражњење. Због тога ће се и искре према штићеном воду развијати управо са тог уземљивача. Прорачунате амплитуде струја атмосферских пражњења које се са уземљивача погођеног екстерног стуба одводе у околно тло су приказане у табели 6.5. Еквивалентну шему система је у овом случају чинило пет екстерних стубова, односно четири распона.

Табела 6.5 – Прорачунате вриједности амплитуда струја атмосферског пражњења које се одводе са уземљивача екстерног стуба

Амплитуда струје пражњења I [kA]			40	60	80	100	120
Вјероватноћа појаве струје $P(I)$ [%] (6.1)			34,0	15,2	7,8	4,5	2,9
ρ [Ωm]	R [Ω]	Дужина распона	Струја која се одводи са уземљивача погођеног екстерног стуба I_p [kA]				
1000	32	200 m	25,9	38,9	51,8	67,9	83,0
2500	80		18,5	30,5	44,6	59,2	72,8
5000	159		15,8	27,8	39,6	52,2	64,1
10000	318		14,5	23,2	32,5	42,3	53,1
1000	32	400 m	30,9	46,3	61,7	80,8	97,4
2500	80		23,8	39,8	57,1	72,9	89,1
5000	159		21,3	36,0	50,3	65,2	80,5
10000	318		18,5	30,7	43,8	55,2	68,8

Максималне дужине искри у околини полусферног уземљивача екстерног стуба су израчунате кориштењем израза (6.2) који је предложен у [200] и који се базира на прорачунатим амплитудама струја из табеле 6.5. Добијене вриједности су приказане у табели 6.6.

$$R_{arc} = \sqrt{\frac{\rho \times I_p}{2\pi \times E_0}} \quad (6.2)$$

гдје су: R_{arc} - дужина електричних искри у тлу [m], ρ - специфична електрична отпорност тла [Ωm], I_p - амплитуда струје пражњења која се одведи са уземљивачког система погођеног екстерног стуба [kA] (прорачунате вриједности су дате у табели 6.5) и E_0 - критична јачина електричног поља при којој се јавља јонизација тла [kV/m], према [34],[144],[145] има вриједност 400 kV/m.

Табела 6.6 – Прорачунате вриједности дужина електричних искри у околини уземљивача екстерног стуба

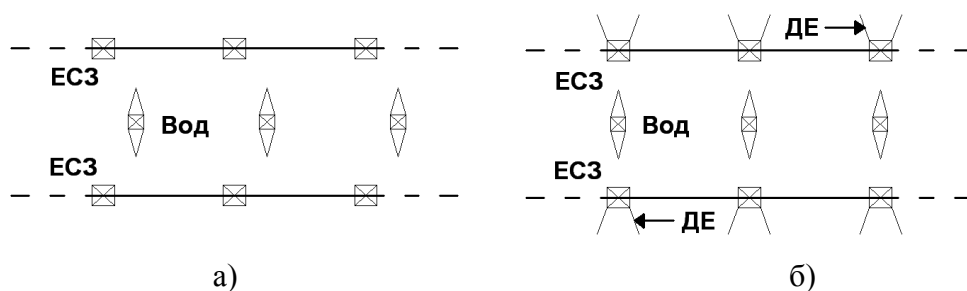
Амплитуда струје пражњења I [kA]		40	60	80	100	120		
Вјероватноћа појаве струје $P(I)$ [%] (6.1)		34,0	15,2	7,8	4,5	2,9		
ρ [Ωm]	R [Ω]	Дужина распона		Дужина искри у тлу R_{arc} [m]				
1000	32	200 m		3,2	3,9	4,5	5,2	5,7
2500	80			4,3	5,5	6,7	7,7	8,5
5000	159			5,6	7,4	8,9	10,2	11,3
10000	318			7,6	9,6	11,4	13,0	14,5
1000	32	400 m		3,5	4,3	5,0	5,7	6,2
2500	80			4,9	6,3	7,5	8,5	9,4
5000	159			6,5	8,5	10,0	11,4	12,7
10000	318			8,6	11,1	13,2	14,8	16,5

Одређивање тачне вриједности минималног растојања између уземљивача (S) је веома компликовано зато што оно зависи и од дужина искри, али и од њихове енергије. Наиме, истре при максималној дужини имају веома малу енергију и не представљају опасност за штићени вод, поготово због високог подносивог напона изолације преносних водова. У инжењерским прорачунима се увијек иде на страну сигурности тако да је оправдана претпоставка да су минималне вриједности растојања S једнаке прорачунатим максималним дужинама искри у тлу (R_{arc}), табела 6.6. На овај начин се добијају веће вриједности растојања S од реално потребних.

У случају када је растојање између уземљивача екстерног стуба и уземљивача стуба штићеног вода (S_E) краће од вриједности S које су дефинисане у табели 6.6

могу се предузети следеће мјере било у комбинацији или појединачно како би се ријешио проблем:

- 1) Повећање растојања S_E на вриједност $S_E \geq S$. Ово је најбоље урадити смицањем екстерног стуба у односу на стуб штићеног вода, како је приказано на слици 6.9 а). При томе је потребно незнатно повећати висину екстерних стубова како би се задржала висока ефикасност заштите вода.
- 2) Задржавање краће вриједности растојања S_E и модификовање уземљивачког система екстерног стуба кориштењем додатних уземљивачких електрода (ДЕ на слици 6.9 б)). Ове електроде морају бити постављене на супротну страну у односу на штићени вод, како би искре које се јављују са уземљивачког система екстерног стуба биле усмјерене на супротну страну у односу на штићени вод. На тај начин се спречава развој искри према штићеном воду.



Слика 6.9 – Модификације екстерног система заштите са циљем да се спријечи појава искри између уземљивача екстерног стуба и уземљивача штићеног вода

6.2.4. Одређивање висине екстерних заштитних ужади изнад фазних проводника штићеног вода - H

Висина H се димензионише тако да се минимизује могућност продора скоковитог лидера мимо екстерних заштитних ужади до штићеног вода. Ради једноставности прорачуна усваја се иста вриједност угиба фазних проводника и заштитних ужади. У том случају је висина екстерних стубова изнад стубова штићеног вода приближно једнака висини екстерних заштитних ужади изнад фазних проводника штићеног вода. У реалности је угиб фазних проводника већи од угиба заштитних ужади што резултује бољим квалитетом заштите.

Потпуна заштита вода од продора скоковитог лидера може се осигурати ако се екстерна заштитна ужад позиционирају унутар области А са слике 6.10. Област А

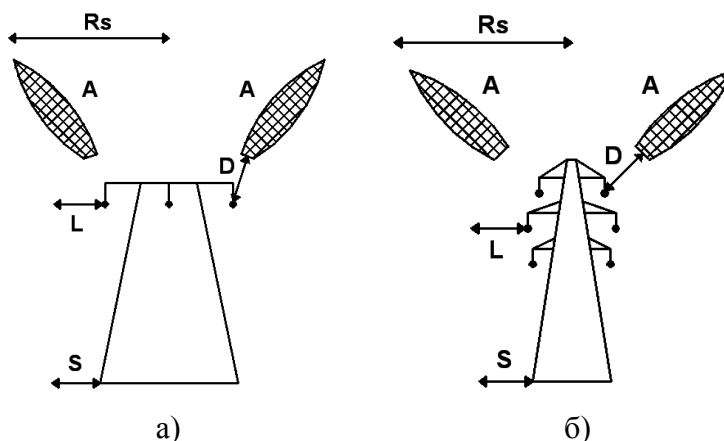
је одређена примјеном програмског пакета AutoCAD [64],[168]. Прорачун је вршен примјеном методе котрљајуће сфере [48] која се базира на електрогеометријском моделу [44]. Ударно растојање R_S је рачунато из израза (6.3) који је предложен у стандарду IEC 62305-1 [43]:

$$R_S = k \cdot I^n = 10 \cdot I^{0.65} \quad (6.3)$$

гдје су: R_S - дужина ударног растојања (полупречник котрљајуће сфере) [m],

I - амплитуда струје атмосферског електричног пражњења [кА],

k, n - емпиријске константе.



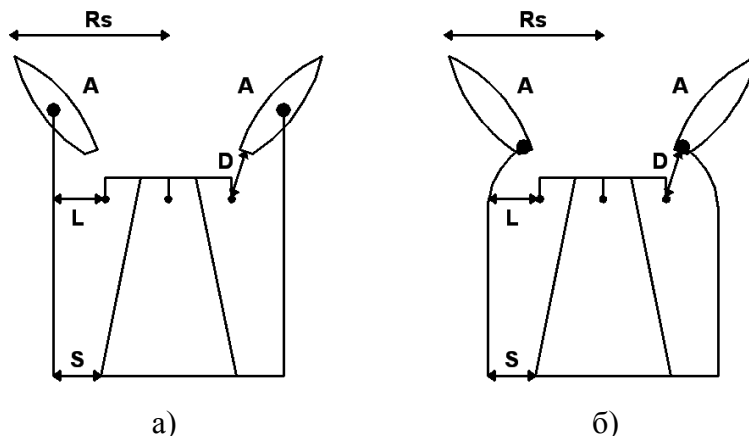
Слика 6.10 – Могуће позиције екстерних заштитних ужади за а) хоризонтални и б) вертикални распоред фазних проводника

Ефикасност екстерног система заштите са аспекта спречавања продора скоковитог лидера до штићеног вода зависи од амплитуде струје пражњења која се усвоји у прорачунима. За веома важне објекте прорачун треба да се врши са амплитудом струје од 3 кА [43], која се јавља са вјероватноћом од 1% [43], односно са вјероватноћом од 0,23% [45]. То значи да ће ефикасност пројектованог система заштите у случају примјене струје амплитуде 3 кА бити 99% или већа. Ударно растојање R_S које одговара струји амплитуде 3 кА износи 20 m [43].

Екстерна заштитна ужад могу да се позиционирају унутар области А са слике 6.10 и 6.11 примјеном екстерних стубова различите геометрије:

- 1) Стуб стандардне геометрије, слика 6.11 а). У овом случају се користе височији стубови са једноставнијом геометријом.
- 2) Стуб модификоване геометрије, слика 6.11 б). У овом случају се користе нижи стубови са сложенијом геометријом.

Избор повољније геометрије екстерних стубова се доноси на бази техничко-економске анализе. Приказане конфигурације екстерних стубова са слике 6.11 се односе на водове са хоризонталним распоредом фазних проводника. Идентична анализа се потпуно аналогно може примјенити и за стубове са вертикалним распоредом фазних проводника.



Слика 6.11 – а) Стандардна и б) модификована геометрија екстерних стубова

6.2.5. Експериментална верификација резултата прорачуна

Експериментална верификација прорачунатих димензија екстерног система заштите са аспекта могућности продора скоковитог лидера до штићеног вода је урађена у Лабораторији за високи напон која се налази на Електротехничком факултету у Источном Сарајеву. Битно је нагласити да постројење за испитивање ударним напоном у оквиру Лабораторије за високи напон дуги низ година није било у функцији. Због тога је, прије извођења експеримента, лабораторија прво морала да се оспособи за рад. Радови у лабораторији су укључивали реализацију уређаја за тригероване ударног генератора, калибрисање мјерне опреме и поправку великог броја ситнијих кварова на различитим уређајима. Опис Лабораторије за високи напон и опис реализованог уређаја за тригероване ударног генератора су дати у Прилогу 1 и Прилогу 2 респективно.

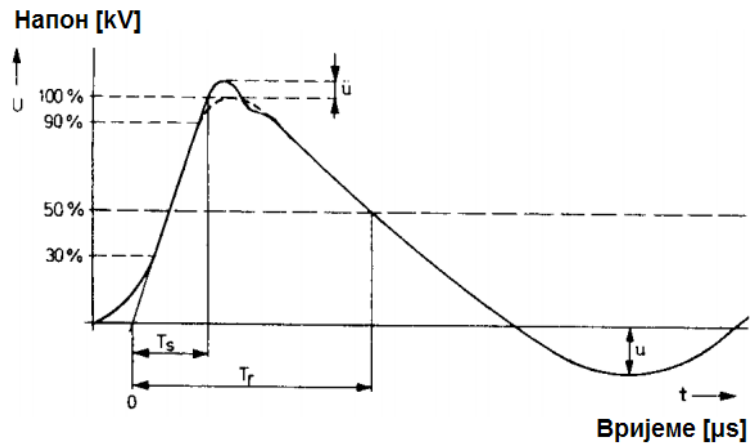
Експериментална верификација резултата нумеричких прорачуна је рађена на физички смањеном моделу система. Ова врста експеримента се често врши у електроенергетици, поготово приликом изучавања заштите објеката од атмосферских пражњења и пропратних пренапона [61],[201],[202]. Разлог томе је што потребни експерименти технички не могу да се изведу у реалним условима или би њихово извођење било прескупо и веома сложено. Нпр. за

експерименталну верификацију димензија екстерног система заштите у реалним условима било би неопходно изградити стубове штићеног вода и екстерни систем заштите реалних димензија. Да би се испитала ефикасност заштите морала би се користити или тригерована атмосферска пражњења или би се морао користити ударни напонски генератор са излазним напоном од неколико милиона волти. Такав експеримент није било могуће извести па је одлучено је да се ради на физички смањеном моделу система који се може испитивати са расположивом опремом.

Експериментална верификација димензија D , L и S није рађена јер би такав експеримент било изузетно тешко спровести, а добијени резултати би били најблаже речено непоуздани. Разлог томе је што прескоци на дугим и кратким ваздушним размацама имају другачије карактеристике и моделују се на различите начине. Због тога не би било коректно правити аналогију између добијених резултата. Такође, моделовање процеса који се одвијају на уземљивачу екстерног стуба примјеном физички смањеног модела система би било изузетно сложено. Са друге стране, ти процеси имају велики утицај на добијене резултате. У прилог наведеним тврдњама иде и чињеница да у литератури нису пронађени експерименти на физички смањеним моделима система у којима се испитује вјероватноћа појаве прескока са једног објекта на други приликом дјеловања атмосферских пренапона.

С обзиром да димензије D , L и S нису експериментално верификоване експеримент је било могуће значајно поједноставити. Карактеристике тла у спроведеном експерименту нису биле од интереса. Простирање таласа на екстерном систему заштите такође није било од интереса, у супротном би се морало вршити скалирање времена чела и зачеља таласа због смањених димензија анализираних система [61]. Подаци од значаја за спроведени експеримент се односе на познавање тачне конфигурације екстерних заштитних ужади и фазних проводника вода.

Експеримент је урађен кориштењем стандардног ударног атмосферског напонског таласа облика $1,2/50 \mu\text{s}/\mu\text{s}$ који је препоручен у [203] и који је приказан на слици 6.12 [204].



Слика 6.12 – Стандардни ударни атмосферски напонски талас [204]

Ознаке са слике 6.12 имају сљедећа значења [204]:

T_s – вријеме трајања чела таласа ($1,2 \mu s \pm 30\%$),

T_r – вријеме трајања зачеља таласа ($50 \mu s \pm 20\%$),

\ddot{u} – премашење у позитивну страну $\leq 5\%$,

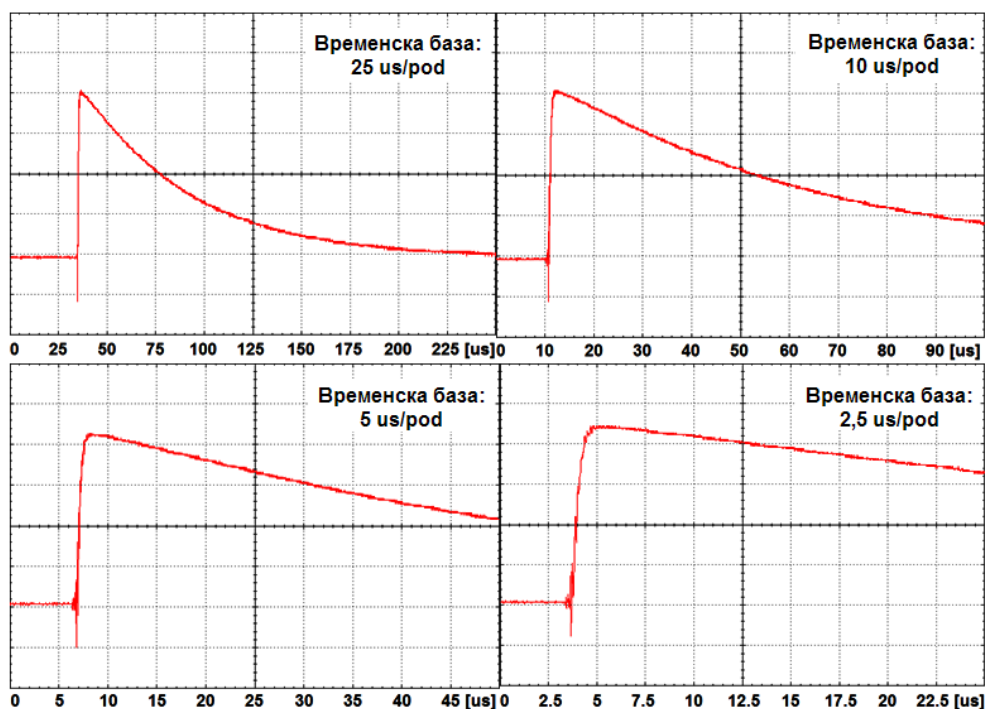
u – премашење у негативну страну $\leq 50\%$.

Наведене бројне вриједности су преузете са сајта произвођача високонапонске испитне опреме Naefely, Швајцарска. Поред референтних вриједности наведена су и максимално дозвољена одступања параметара таласа. Основне карактеристике ударног напонског таласа су поларитет, максимална вриједност, вријеме трајања чела и вријеме трајања зачеља. Вријеме трајања чела таласа T_s је параметар који је дефинисан као 1,67 пута временски интервал између тренутака у којима напонски импулс има вриједност 30% и 90% своје максималне вриједности. Вријеме трајања зачеља таласа T_r је параметар који се дефинише као временски интервал између привидног почетка таласа (0 на слици 6.12) и тренутка када напон опадне на половину своје максималне вриједности.

У експерименту је кориштена максимална вриједност излазног напона ударног напонског генератора која приближно износи око 406 kV. Примјена ударног напонског таласа максималне амплитуде омогућава мањи коефицијент скалирања експерименталне поставке. Амплитуда ударног напона је измјерена примјеном мјерних кугластих искришта како је објашњено у Прилогу 1. Максимални излазни напон ударног напонског генератора је био довољан да се у сваком појединачном експерименту на физички смањеном моделу система произведе прескок на растојању од 50 cm. Потребно је нагласити да тачна вриједност амплитуде

излазног напона ударног генератора није од значаја за експеримент. За експеримент је једино значајан податак о максималном растојању на коме се са 100%-тном вјероватноћом дешава прескок између испитних електрода (50 cm у овом случају).

Таласни облици ударног напонског таласа који су кориштени у експерименту и који су снимљени у Лабораторији за високи напон су приказани на слици 6.13. Снимана су четири позитивна ударна напонска таласа са четири различите временске базе осцилоскопа. Са временском базом од 25 $\mu\text{s}/\text{pod}$ види се цијели талас, док се са временском базом од 2,5 $\mu\text{s}/\text{pod}$ види чело таласа. Ударни напонски талас је у складу са претходно дефинисаним захтјевима. У високонапонским лабораторијама се за испитивање потребних изолационих растојања најчешће користе ударни напонски таласи позитивног поларитета јер они имају ниже вриједности прескочног напона у односу на таласе негативног поларитета [149].



Слика 6.13 –Таласни облици ударног напонског таласа позитивног поларитета облика 1,2/50 $\mu\text{s}/\mu\text{s}$ снимљени са различитим временским базама осцилоскопа

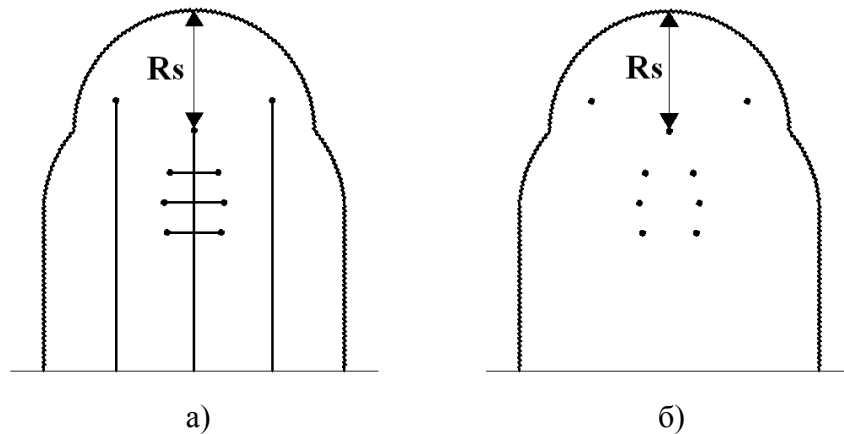
Прорачун димензија екстерног система заштите са аспекта вјероватноће продора скоковитог лидера до штићеног вода је урађен примјеном струје амплитуде 3 kA, тј. ударног растојања од 20 m. На тај начин је пројектована

заштита која има теоријску ефикасност од преко 99%. Приликом креирања физички смањеног модела система коефицијент скалирања димензија је одређен као однос дужине ударног растојања које је у прорачунима усвојено да износи 20 m и максималног међуелектродног растојања на коме се са 100%-тном вјероватноћом догађа прескок и које износи 50 cm. С тога коефицијент скалирања k има вриједност:

$$k = \frac{R_{ud}}{d_{max}} = \frac{20}{0,5} = 40 \quad (6.4)$$

Дакле, приликом формирања физички смањеног модела система усвојене су 40 пута мање димензије у односу на реални систем. Моделовање фазних проводника и заштитних ужади у експерименту је урађено проводном жицом пречника 1,5 mm. У реалности фазни проводник има већи пречник од заштитног ужета, али у овој врсти експеримента такви детаљи нису од интереса.

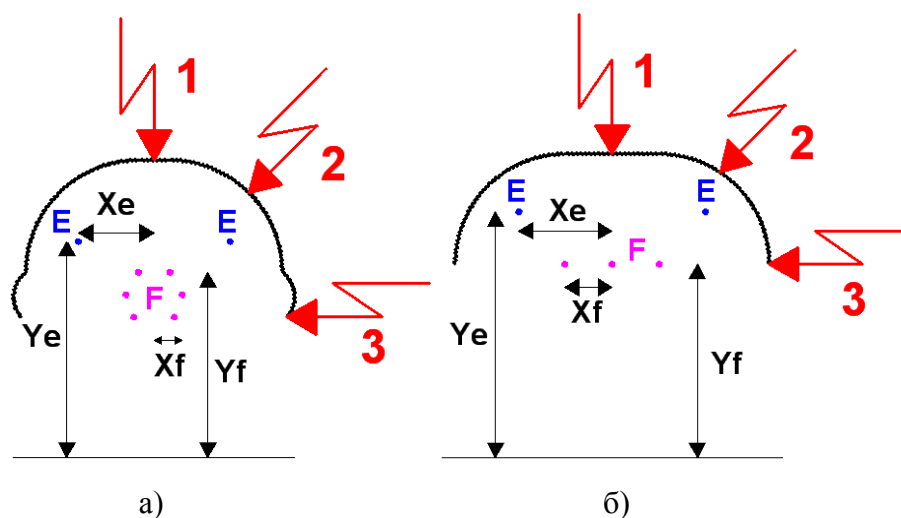
Графичко објашњење начина креирања експерименталне поставке а на основу произвољне реалне конфигурације је дато на слици 6.14. На слици 6.14 а) је приказана конфигурација произвољног реалног система. На слици 6.14 б) је приказана експериментална поставка којом је реални систем замијењен. Експериментална поставка се састоји само од жица које симулирају екстерну заштитну ужад и фазне проводнике вода.



Слика 6.14 – а) Реална конфигурација система и б) експериментална замјенска поставка

Еквивалентне шеме система са вертикалним и хоризонталним распоредом фазних проводника које су кориштене у експериментима су приказане на слици 6.15 а) и 6.15 б) респективно. Црном цик-цак линијом је приказано ударно

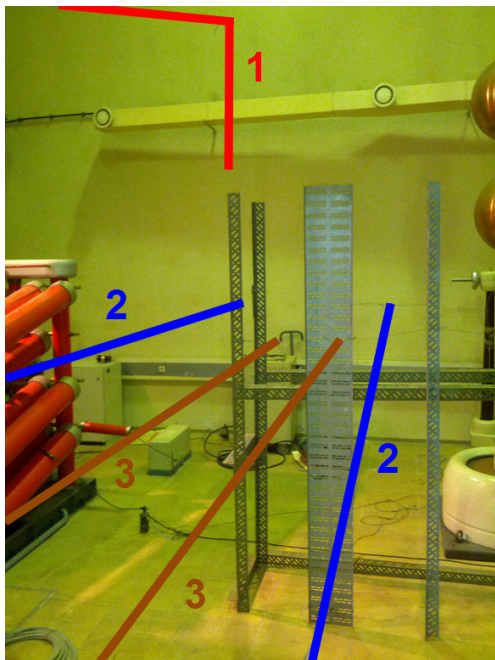
расстојање од фазних проводника које износи 20 m у реалном систему, а 50 cm у експерименту. Са Е је означена позиција екстерног заштитног ужета које има координате (X_e, Y_e) , а са F је означена позиција фазног проводника који има координате (X_f, Y_f) . Анализирана је могућност наиласка скоковитог лидера из различитих праваца, бројеви 1, 2 и 3 на слици 6.15. И симулационом и експерименталном анализом је показано да једино пражњење која долазе окомито у односу на осу вода и које је на слици 6.15 означена бројем 1 може да прође до штићеног вода мимо екстерног система заштите. Пражњења означена бројевима 2 и 3 не могу проћи до штићеног вода ни у једном од анализираних случајева.



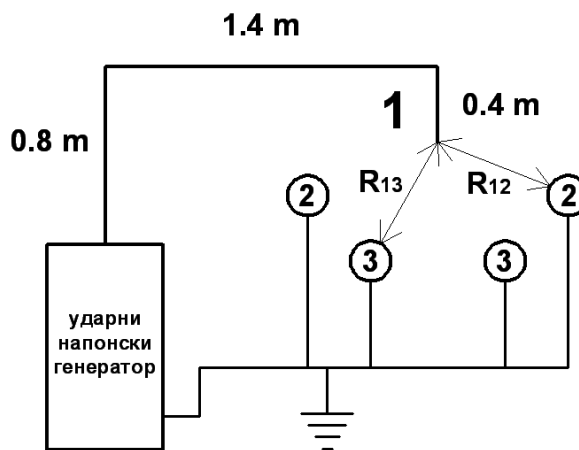
Слика 6.15 – Експериментални модели система за случај када штићени вод има
а) вертикални и б) хоризонтални распоред фазних проводника

Модел система, на коме су вршена експериментална испитивања, је приказан на слици 6.16 а). Шематски приказ експерименталне поставке са диспозицијом опреме и димензијама система је приказан на слици 6.16 б). Бројем 1, односно црвеном бојом, је означена жица која је повезана на излаз ударног напонског генератора и која моделује канал атмосферског пражњења, тј. позицију скоковитог лидера прије последњег скока. Са 2, односно плавом бојом, су означена екстерна заштитна ужада која су уземљена на уземљивач постројења. Са 3, односно смеђом бојом, су означени фазни проводници вода који су такође везани на уземљивач постројења. С обзиром да се посматра само скоковити лидер који долази вертикално у односу на штићени вод, потребно је моделовати само горње фазне проводнике вода са вертикалним распоредом фазних проводника. У случају вода са хоризонталним распоредом фазних проводника прескоци се

увијек дешавају према средњем проводнику јер је он најближи излазној жици из ударног напонског генератора. Због тога је у експерименту једино овај фазни проводник од интереса.



а)



б)

Слика 6.16 – а) Фотографија експерименталног модела двосистемског вода са вертикалним распоредом фазних проводника и б) шематски приказ система

Да би се реализовао експеримент потребно је знати тачну конфигурацију система, тј. тачне позиције екстерних заштитних ужади и фазних проводника вода. Са повећањем растојања између фазних проводника и са повећањем удаљености екстерних заштитних ужади од штићеног вода вјероватноћа продора скоковитог лидера до штићеног вода расте. Због тога су у експерименту одабрани стубови великих димензија са конзолама великих дужина, а одабрана су и велика хоризонтална растојања између екстерних стубова и стубова штићеног вода. Екстерна ужад су позиционирана тако да имају минималну потребну висину за прорачунати високи степен екранизације вода. Подаци о димензијама стубова су преузети из документације ЕМС-а која је кориштена приликом израде студије [21]. Добијени резултати су приказани у табели 6.7. У истој табели су приказани и подаци о позицијама екстерних ужади и фазних проводника.

У првом случају мјерења су вршена за конфигурацију у којој је растојање од излаза из ударног напонског генератора до фазног проводника (R_{13}) једнако

растојању од излаза из ударног напонског генератора до екстерног заштитног ужета (R_{12}). Нумерички прорачуни показују да ће се свако атмосферско пражњење десити у екстерно заштитно уже ако је растојање R_{12} бар мало краће од растојања R_{13} . Ипак, у експерименту је добијено да се у том случају 50% прескока одвија у екстерно уже, а 50% у фазни проводник (могла су се добити и мања одступања). Овај резултат је логичан и последица је чињенице да су ударна растојања према жицама једнака. У сљедећем кораку је растојање R_{12} скраћено за 3,5 cm у односу на растојање R_{13} што у реалности одговара дужини од 1,4 m. У овом случају се 80% прескока дешавало према екстерном ужету. У случају када је растојање R_{12} скраћено за 4 cm у односу на растојање R_{13} , што у реалности одговара дужини од 1,6 m, 90% прескока се дешавало према екстерном ужету. Максимална ефикасност заштите од 100% је постигнута у случају када је растојање R_{12} скраћено за 5 cm у односу на растојање R_{13} , што у реалности одговара дужини од 2 m.

Табела 6.7 – Експериментално одређена ефикасност екстерног система заштите вода са хоризонталним распоредом проводника (портални или Y стуб) - 1

Улазни подаци	Xf	Xe	Ye-Yz
		23 cm ↔ 9,2 m	44 cm ↔ 17,6 m
Резултати експеримента			Ефикасност заштите
укупан број мјерења	прескок према екстерном ужету	прескок према проводнику	
$R_{12}=R_{13}$			
20	10	10	<u>50%</u>
$R_{12}=R_{13}-3,5$ cm			
30	24	6	<u>80%</u>
$R_{12}=R_{13}-4$ cm			
40	36	4	<u>90%</u>
$R_{12}=R_{13}-5$ cm			
40	40	0	<u>100%</u>

Експеримент је поновљен за случај када је хоризонтално растојање између екстерних ужади и штићеног вода краће. Добијени резултати су приказани у

табели 6.8. У истој табели су приказани и подаци о позицијама екстерних ужади и фазних проводника.

Табела 6.8 – Експериментално одређена ефикасност екстерног система заштите вода са хоризонталним распоредом проводника (портални или Y стуб) - 2

Улазни подаци	Xf	Xe	Ye-Yz
	23 cm ↔ 9,2 m	30,5 cm ↔ 12,2 m	24 cm ↔ 9,6 m
Резултати експеримента			Ефикасност заштите
укупан број мјерења	прескок према екстерном ужету	прескок према проводнику	
$R_{12}=R_{13}-3,5$ cm			
40	35	5	<u>87,5%</u>
$R_{12}=R_{13}-4,5$ cm			
40	37	3	<u>92,5%</u>
$R_{12}=R_{13}-5$ cm			
40	40	0	<u>100%</u>

У случају када је растојање R_{12} краће за 3,5 cm у односу на растојање R_{13} што у реалности одговара дужини од 1,4 m, добијено је да се 87,5% прескока дешава према екстерном ужету. У случају када је растојање R_{12} скраћено за 4,5 cm у односу на растојање R_{13} , што у реалности одговара дужини од 1,8 m, 92,5% прескока се дешавало према екстерном ужету. Максимална ефикасност заштите од 100% је постигнута у случају када је растојање R_{12} скраћено за 5 cm у односу на растојање R_{13} , што у реалности одговара дужини од 2 m. Закључује се да се резултати оба експеримента доста добро слажу. У другом случају је постигнута незнатно виша ефикасност заштите због тога што су екстерна заштитна ужад постављена ближа штићеном воду.

Резултати експеримента за случај вода са вертикалним распоредом фазних проводника су приказани у табели 6.9. У истој табели су приказани и подаци о позицијама екстерних ужади и фазних проводника.

Табела 6.9 – Експериментално одређена ефикасност екстерног система заштите вода са вертикалним распоредом проводника (буре или јела стуб)

Улазни подаци	Xf	Xe	Ye–Yz
		13 cm ↔ 5,2 m	34 cm ↔ 13,6 m
Резултати експеримента			Ефикасност заштите
укупан број мјерења	прескок према екстерном ужету	прескок према проводнику	
$R_{12}=R_{13}-3,5\text{ cm}$			
30	25	5	<u>83,3%</u>
$R_{12}=R_{13}-4,5\text{ cm}$			
30	40	0	<u>100%</u>

У првом случају мјерења су рађена за конфигурацију у којој је растојање R_{12} краће за 3,5 cm у односу на растојање R_{13} што у реалности одговара дужини од 1,4 m. У овој конфигурацији се 83,3% прескока дешавало према екстерном заштитном ужету. У случају када је растојање R_{12} скраћено за 4,5 cm у односу на растојање R_{13} , што у реалности одговара дужини од 1,8 m, 100% прескока се дешавало према екстерном ужету.

Резултати експеримената за водове са хоризонталним и вертикалним распоредом фазних проводника се доста добро слажу. У случају када се екстерна заштитна ужад поставе ближе штићеном воду постиже се нешто већа ефикасност заштите. Разлике које су добијене за водове са различитим распоредом фазних проводника потичу од чињенице да је на воду са хоризонталним распоредом проводника средњи проводник слабије екраниран екстерним заштитним ужадима у односу на два горња фазна проводника вода са вертикалним распоредом проводника.

На основу приказаних резултата може се закључити да је код вода са хоризонталним, односно вертикалним, распоредом фазних проводника у прорачунима потребно усвојити 2 m, односно 1,8 m респективно, краће ударно растојање од екстерних заштитних ужади (R_{12}) у односу на ударно растојање од фазних проводника (R_{13}) да би се добила 100% ефикасност заштите. Ради поједностављења могуће је усвојити разлику од 2 m за обје конфигурације. Овај

результат се може практично примјенити тако што се ударно растојање од штићеног вода рачуна примјеном израза (6.5) [33],[43],[55], док се ударно растојање од екстерног система заштите рачуна примјеном израза (6.6) [33],[55]:

$$R_{SV} = k \cdot I^n = 10 \cdot I^{0.65} \quad (6.5)$$

$$R_{SE} = k \cdot I^n = 9 \cdot I^{0.65} = 0,9 \cdot R_{SV} \quad (6.6)$$

гдје су: R_{SV} – дужина ударног растојања од штићеног вода [m],

R_{SE} – дужина ударног растојања од екстерног система заштите [m],

I – амплитуда струје атмосферског електричног пражњења [kA],

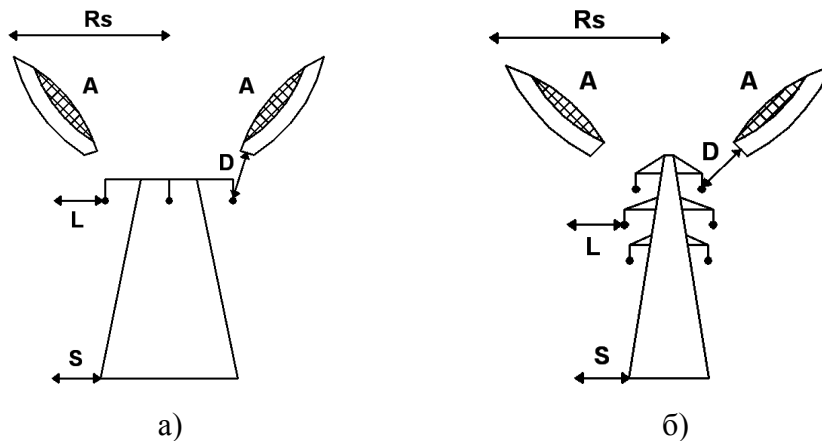
k, n - емпиријске константе.

Примјена различитих вриједности ударног растојања од вода и од тла је детаљно дискутована у [55],[56]. Веома је занимљиво примјетити да је експериментално добијени израз (6.6) предложен у техничким брошурама [33],[55] за рачунање ударног растојања од тла. Овим експериментом је показано да се израз (6.6) може користити и за рачунање ударног растојања од свих уземљених објеката, било да су то околни стубови или равно тло. Овим су, на одређени начин, верификовани и добијени експериментални резултати јер је њиховом примјеном изведена формула која је већ прихваћена у међународним стандардима.

Неопходно је нагласити да иако су резултати експеримената на физички смањеним системима веома корисни, они се морају прихватити са одређеном резервом. Разлог томе је што физички смањен систем није потпуно еквивалентан реалном систему. Тако се нпр. карактеристике прескока на дугим и кратким ваздушним размацима веома разликују и другачије се моделују. У експерименту се занемарује утицај радног напона на мјесто атмосферског пражњења што може узроковати грешке, поготово у случају водова са високим радним напоном. Моделовање скоковитог лидера ударним напоном стандардног таласног облика 1,2/50 $\mu\text{s}/\mu\text{s}$ није потпуно реално, поготово јер се занемарује утицај индукованих напона у систему који су последица приближавања скоковитог лидера. Даља верификација димензија екстерног система заштите се може урадити у високонапонској лабораторији за излазним напоном реда неколико MV или у реалним условима на експерименталном воду.

6.2.6. Примјена експериментално добијених резултата на димензионисање екстерног система заштите

Област А, која је приказана на сликама 6.10 и 6.11, се мора модификовати у складу са резултатима експеримента како би се обезбједио бољи квалитет заштите вода од продора скоковитог лидера. Експериментални резултати се могу примјенити у прорачунима тако што се ударно растојање од фазних проводника штићеног вода и од екстерних заштитних ужади у методи котрљајуће сфере рачуна примјеном израза (6.5) и (6.6) респективно. Модификована област А, која је одређена на овај начин, је приказана на слици 6.17 као шрафирана површина. У овом случају област А је смањена, а минимална потребна висина екстерних заштитних ужади је повећана.

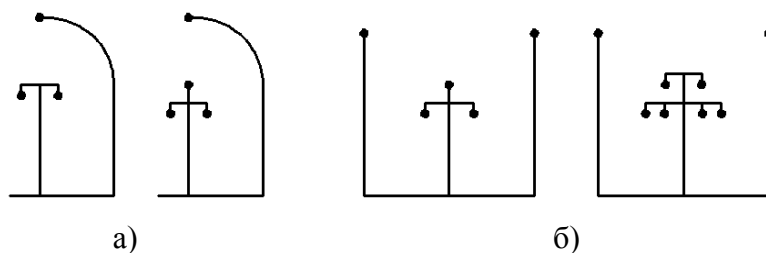


Слика 6.17 – Модификована област А за водове са а) хоризонталним и б) вертикалним распоредом фазних проводника

6.3. Екстерни систем заштите надземних дистрибутивних водова

Нацрт екстерног система заштите дистрибутивних надземних водова са једним и са два екстерна заштитна ужета је приказан на слици 6.18. Тлоцрт екстерног система заштите дистрибутивних водова је исти као у случају преносних водова и приказан је на слици 6.7. Генерално, постоје двије битне разлике између екстерног система заштите преносних и дистрибутивних надземних водова. Код дистрибутивних водова са ниским стубовима квалитетна екстерна заштита се може реализовати примјеном једног екстерног заштитног ужета, слика 6.18 а). Оваква конфигурација екстерног система заштите није предложена за преносне водове због ниске ефикасности која је узрокована знатно већим димензијама

стубова. Примјеном једног екстерног заштитног ужета може се знатно поједноставити и појефтинити изградња екстерног система заштите. Друга битна разлика је да су дистрибутивни водови, усљед ниског подносивог напона изолације, угрожени и од индукованих напона. Због тога се приликом реализовања екстерног система заштите дистрибутивних водова мора водити рачуна и о заштити од индукованих напона.



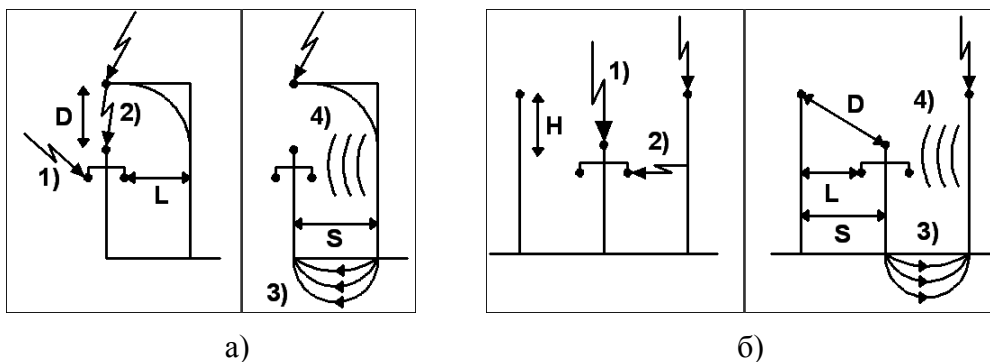
Слика 6.18 – Нацрт екстерног система заштите дистрибутивних надземних водова који је реализован примјеном а) једног или б) два екстерна заштитна ужета

И у овом случају се димензионисање екстерног система заштите врши уз услов да се задовоље два опречна захтјева:

1. Остваривање минималне вјероватноће продора скоковитог лидера до штићеног вода.
2. Остваривање минималне вјероватноће појаве прескока са екстерног система заштите према штићеном воду.

Да би се оптимално задовољили наведени захтјеви морају се дефинисати критични догађаји који могу довести до појаве испада штићеног вода из погона. У случају примјене екстерног система заштите на дистрибутивним надземним водовима постоје четири сценарија према којима се може догодити испад штићеног вода из погона усљед дјеловања атмосферских пражњења:

1. Директно атмосферско пражњење у штићени вод мимо екстерног система заштите, означено са 1) на слици 6.19.
2. Прескок са екстерног система заштите према фазном проводнику штићеног вода, означено са 2) на слици 6.19.
3. Прескок са уземљивача екстерног стуба према уземљивачу стуба штићеног вода, означено са 3) на слици 6.19.
4. Испад штићеног вода усљед дјеловања индукованих напона, означено са 4) на слици 6.19.



Слика 6.19 – Четири сценарија према којима се може догодити испад из погона дистрибутивног вода који је штићен са а) једним, б) два екстерна заштитна ужета

Да би се минимизовала могућност појаве неког од ова четири сценарија морају се правилно димензионисати четири димензије означене на слици 6.19 са D , L , H и S , и морају се користити линијски одводници пренапона:

D – растојање између екстерног заштитног ужета и фазног проводника штићеног вода. Ово растојање се димензионише тако да се минимизује могућност појаве прескока са екстерног заштитног ужета према фазном проводнику штићеног вода у случају када се атмосферско пражњење одвија у екстерно заштитно уже.

L – растојање између екстерног стуба и фазног проводника штићеног вода. Ово растојање се димензионише тако да се минимизује могућност појаве прескока са екстерног стуба према фазном проводнику штићеног вода у случају када се атмосферско пражњење одвија у врх екстерног стуба.

H – висина екстерних заштитних ужади изнад фазних проводника штићеног вода. Ова висина се димензионише тако да се минимизује могућност продора скоковитог лидера до штићеног вода, а мимо екстерних заштитних ужади.

S – растојање између уземљивача екстерног стуба и уземљивача стуба штићеног вода. Ово растојање се димензионише тако да се минимизује могућност појаве прескока са уземљивача екстерног стуба на уземљивач стуба штићеног вода у случају када се атмосферско пражњење догоди у врх екстерног стуба.

Појава прескока који су узроковани дјеловањем индукованих напона на фазним проводницима вода се спречава уградњом линијских одводника пренапона.

Сценарији 1), 2) и 3), као и одређивање растојања H , D , L и S , су детаљно објашњени у претходном поглављу. Сценарио 4) је обрађен у овом поглављу јер он није од интереса приликом пројектовања екстерног система заштите преносних водова који имају висок подносиви напон изолације.

Када се уводи нови систем заштите надземних водова од атмосферских пренапона циљ је да се постигну максималне перформансе заштите уз минимална улагања материјалних средстава. Због тога је неопходно одредити минималне вриједности растојања H , D , L и S , као и минималан број линијских одводника пренапона који треба да се користе.

У табели 6.10 су дати основни улазни параметри за прорачуне који ће се користити у прорачунима у овом поглављу. Усвојени су типични подаци.

Табела 6.10 – Основни улазни параметри за прорачуне

Висина екстерног стуба	20 m	Карактеристична импеданса стуба	200 Ω
Еквивалентни полупречник уземљивача стуба	3 m	Карактеристична импеданса заштитног ужета	550 Ω

Модели елемената који ће се користити у прорачунима су исти као у претходном поглављу и наведени су у табели 6.11. Избор оптималних модела елемената је урађен у складу са закључцима презентованим у поглављу 4, тј. у подпоглављу 4.8. У овом поглављу се користи исти начин прорачуна као у претходном поглављу, с тим што улазни параметри за прорачуне одговарају типичним параметрима дистрибутивних водова. Општа објашњења о начину прорачуна појединих димензија екстерног система заштите која су наведена у претходном поглављу се неће понављати. И у овом случају нису моделовани радни напон вода и електромагнетне спреге између ужаци. Овим приступом прорачун је знатно поједностављен, а добијени су критичнији резултати. Такође, добијени су општи резултати који се могу примјенити на водове са различитим називним напоном и са различитом конфигурацијом главе стуба. Ова проблематика је детаљније дискутована у претходном поглављу.

Табела 6.11 – Основни модели елемената за прорачуне

Елемент	Модел
Таласни облик струје пражњења	Троугаони, 5,6/77 $\mu\text{s}/\mu\text{s}$
Карактеристична импеданса канала пражњења	1000 Ω
Модел стуба	IEEE модел, (4.15)
Модел уземљивача стуба	Јонизациони модел
Модел прескока на ваздушној изолацији	LPM метода
Модел заштитних ужади	550 Ω , 300 m/ μs
Радни напон и утицај електромагнетних спрега између ужади су занемарени.	
Оптimalан број распона екстерног система заштите је приказан на слици 4.1.	

6.3.1. Одређивање растојања између екстерних заштитних ужади и фазних проводника штићеног вода - D

Прорачунате вриједности растојања D за различите вриједности амплитуда струја атмосферских пражњења и за различите вриједности специфичне електричне отпорности тла су приказане у табели 6.12. При малим вриједностима растојања D мора се водити рачуна да се не наруше минимална потреба изолациона растојања која су прописана за склопне или привремене пренапоне.

Табела 6.12 – Прорачунате вриједности растојања D

Амплитуда струје пражњења I [kA]			40	60	80	100	120
Вјероватноћа појаве струје $P(I)$ [%] (6.1)			34,0	15,2	7,8	4,5	2,9
ρ [Ωm]	R [Ω]	Дужина распона	Растојање D [m]				
500	27	100 m	1,0	1,5	2,0	2,4	2,9
1000	53		1,4	2,0	2,5	3,0	3,5
2500	133		2,2	2,8	3,4	4,0	4,6
5000	265		2,9	3,8	4,7	5,4	6,1
500	27	150 m	1,3	1,9	2,5	3,1	3,7
1000	53		1,6	2,4	3,0	3,6	4,2
2500	133		2,4	3,2	3,9	4,7	5,4
5000	265		3,1	4,2	5,1	6,0	6,8

6.3.2. Одређивање растојања између екстерног стуба и фазних проводника штићеног вода - L

Прорачунате вриједности растојања L за различите вриједности амплитуда струја атмосферских пражњења и за различите вриједности специфичне електричне отпорности тла су приказане у табели 6.13. При малим вриједностима растојања L мора се водити рачуна да се не наруше минимална потреба изолациона растојања која су прописана за склопне или привремене пренапоне.

Табела 6.13 – Прорачунате вриједности растојања L

Амплитуда струје пражњења I [кА]			40	60	80	100	120
Вјероватноћа појаве струје $P(I)$ [%] (6.1)			34,0	15,2	7,8	4,5	2,9
ρ [Ωm]	R [Ω]	Дужина распона	Растојање L [m]				
500	27	100 m	0,9	1,4	1,7	1,9	2,1
1000	53		1,5	1,9	2,3	2,6	3,0
2500	133		2,3	3,0	3,6	4,1	4,7
5000	265		3,3	4,3	5,1	5,8	6,5
500	27	150 m	1,0	1,5	1,7	2,0	2,3
1000	53		1,6	2,0	2,4	2,8	3,2
2500	133		2,4	3,1	3,8	4,4	4,9
5000	265		3,4	4,4	5,3	6,1	6,8

6.3.3. Одређивање растојање између уземљивача екстерног стуба и уземљивача стуба штићеног вода - S

Прорачунате вриједности амплитуда струја које се одводе са уземљивача екстерног стуба у који се десило атмосферско пражњење су приказане у табели 6.14. Ове струје се користе за прорачун максималних дужина искри које се јављају у тлу у околини уземљивача екстерног стуба када се у њега догоди атмосферско пражњење.

Табела 6.14 – Прорачунате вриједности амплитуда струја атмосферског пражњења које се одводе са уземљивача екстерног стуба

Амплитуда струје пражњења I [kA]			40	60	80	100	120
Вјероватноћа појаве струје $P(I)$ [%] (6.1)			34,0	15,2	7,8	4,5	2,9
ρ [Ωm]	R [Ω]	Дужина распона	Струја која се одводи са уземљивача погођеног екстерног стуба I_p [kA]				
500	27	100 m	21,6	32,4	43,2	58,9	73,7
1000	53		16,6	27,7	41,0	53,9	66,9
2500	133		15,1	25,5	34,4	44,1	54,5
5000	265		12,8	20,4	28,3	36,9	46,2
500	27	150 m	24,8	37,3	51,6	67,6	83,7
1000	53		19,5	33,5	47,6	62,1	76,3
2500	133		17,7	29,2	39,8	52,3	63,8
5000	265		14,7	23,9	33,4	44,0	54,8

Прорачуне вриједности максималних дужина електричних искри у околини полусферног уземљивача екстерног стуба су приказане у табели 6.15. Прорачун је вршен примјеном израза (6.2).

Табела 6.15 – Прорачунате вриједности максималних дужина електричних искри у околини уземљивача екстерног стуба

Амплитуда струје пражњења I [kA]			40	60	80	100	120
Вјероватноћа појаве струје $P(I)$ [%] (6.1)			34,0	15,2	7,8	4,5	2,9
ρ [Ωm]	R [Ω]	Дужина распона	Дужина искри у тлу R_{arc} [m]				
500	27	100 m	2,1	2,5	2,9	3,4	3,8
1000	53		2,6	3,3	4,0	4,6	5,2
2500	133		3,9	5,0	5,9	6,6	7,4
5000	265		5,0	6,4	7,5	8,6	9,6
500	27	150 m	2,2	2,7	3,2	3,7	4,1
1000	53		2,8	3,7	4,4	5,0	5,5
2500	133		4,2	5,4	6,3	7,2	8,0
5000	265		5,4	6,9	8,2	9,4	10,4

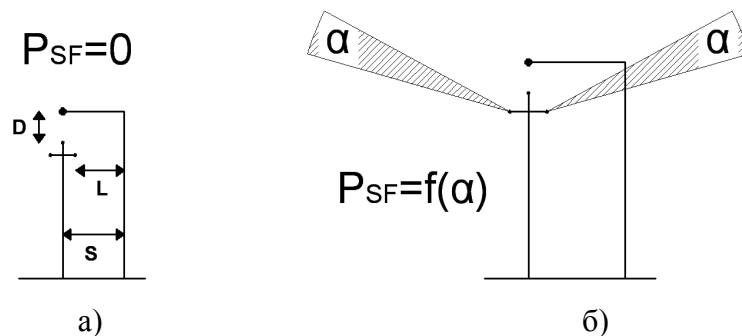
И у овом случају је усвојено да су минималне дужине растојања S једнаке прорачунатим максималним дужинама искри у тлу (R_{arc}), табела 6.15. У случају када је растојање између уземљивача екстерног стуба и уземљивача стуба штићеног вода краће од вриједности из табеле 6.15 могу се предузети исте мјере које су описане за преносне водове, поглавље 6.2.3, како би се ријешило проблем. Прва опција је да се растојање између два уземљивача повећа на дужину већу или једнаку R_{arc} . Друга опција је да се задржи постојеће растојање али да се изврши модификација уземљивача екстерних стубова како би искре које се са њих формирају биле усмјерене на супротну страну у односу на штићени вод.

6.3.4. Одређивање висине екстерних заштитних ужади изнад фазних проводника штићеног вода - H

Одређивање висине екстерних заштитних ужади изнад фазних проводника штићеног вода је урађено примјеном методе котрљајуће сфере како је објашњено у поглављу 6.2.4. Прорачун је урађен уважавајући различите вриједности ударних растојања повезног лидера према штићеном воду и према екстерном систему заштите, изрази (6.5) и (6.6) респективно.

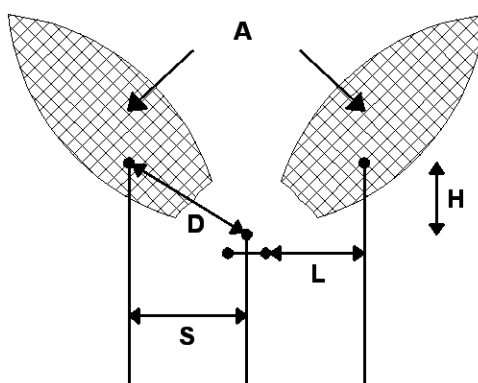
Једно екстерно заштитно уже може обезбједити висок степен заштите дистрибутивним водовима са ниским стубовима (нпр. 11 m) који имају кратке конзоле (нпр. 1 m) и кратка међуфазна растојања (нпт. 1,4 m), слика 6.20 а). У том случају се екстерно заштитно уже поставља у оси штићеног стуба и на висини D изнад горњег фазног проводника. У случају да глава стуба штићеног вода има специфичну геометрију (различите дужине конзола, постављање свих фазних проводника са једне стране стуба и слично) екстерно уже се поставља тако да оптимално екранира све фазне проводнике.

У случају заштите дистрибутивног вода са вишим стубовима (нпр. 15 m), који обично имају и дуже конзоле па самим тим и дужа међуфазна растојања, једно заштитно уже не може ефикасно екранирати све фазне проводнике од директних атмосферских пражњења. Због тога постоји одређена вјероватноћа продора скоковитог лидера до штићеног вода, слика 6.20 б). Ако је ова вјероватноћа неприхватљиво велика, екстерна заштита се мора реализовати примјеном два заштитна ужета.



Слика 6.20 – Ефикасност екстерног система заштите са једним заштитним ужетом на дистрибутивном воду висине а) 11 m б) 15 m

У случају примјене два екстерна заштитна ужета област А, у коју морају да се смјесте екстерна ужад, се одређује примјеном методе котрљајуће сфере, исто као у поглављу 6.2.4. Ова област је приказана на слици 6.21. Висина екстерних заштитних ужади изнад горњег фазног проводника вода у овом случају износи H .



Слика 6.21 – Могуће позиције екстерних заштитних ужади

6.3.5. Одређивање потребног броја линијских одводника пренапона на воду

Услјед ниског подносивог напона изолације дистрибутивни водови су веома угрожени и од индукованих напона на фазним проводницима који се јављају као посљедица релативно блиских атмосферских пражњења. На дистрибутивним водовима називног напона 10 kV индуковани напони могу проузроковати прескоке и у случају када се атмосферско пражњење одвија на удаљености до 1000 m [23]. Утицај индукованих напона на вод се смањује порастом изолационог напона вода, смањењем дужине вода, порастом растојања између мјеста пражњења и вода, смањењем амплитуде струје пражњења, примјеном заштитних ужади итд.

Екстерни систем заштите доводи атмосферско пражњење веома близуштићеном воду због чега на његовим фазним проводницима долази до појаве веома високих индукованих напона. Минималан потребни број линијских одводника пренапона на штићеном воду се мора одређивати за овај најкритичнији случај. Прорачун амплитуде индукованих напона на штићеном воду у случају када се атмосферско пражњење догоди у екстерни систем заштите је веома компикован. За такве прорачуне би се морала развити потпуно нова методологија. Наиме, сви постојећи модели за прорачуне амплитуда индукованих напона на водовима се односе на случај када се атмосферско пражњење догоди у тло поред вода. У случају атмосферског пражњења у екстерни систем заштите струја пражњења се затвара и кроз екстерну заштитну ужад и кроз екстерне стубове, што је знатно другачије у односу на случај пражњења у тло. Због тога прорачуне није могуће вршити примјеном постојећих модела. Такође, усљед велике близине скоковитог лидера штићеном воду на његовим фазним проводницима долази до индуковања значајних напона непосредно прије појаве повезног лидера. Након појаве повезног лидера велика близина канала атмосферског пражњења такође утиче на индуковање напона на штићеном воду.

Због свега наведеног прорачуни амплитуде индукованих напона на фазним проводницима штићеног вода нису рађени. Умјесто тога, заштита вода од индукованих напона је пројектована на бази публикованих радова који се баве овом проблематиком [59],[61],[108],[114],[115],[199]. Претходно је наведено да блиска атмосферска пражњења изазивају индуковане напоне веће амплитуде него удаљена пражњења. Максимална амплитуда индукованих напона на водовима је испод 350 kV [199]. То значи да су водови, који имају подносиви напон изолације од минимум 350 kV, заштићени од индукованих напона. Водови који имају нижи подносиви напон изолације од 350 kV такође могу бити заштићени од индукованих напона у случају када им је дужина релативно мала. Значајан аспект заштите водова од индукованих напона је што се заштита може реализовати и након изградње вода и екстерног система заштите. Ако би се након изградње система испоставило да је вод угрожен од индукованих напона, иако су постојале претпоставке да се то неће десити, вод је могуће штитити примјеном линијских одводника пренапона. Вод се може штитити и повећавањем подносивог напона

његове изолације на вриједност од минимум 350 kV, али се то мора радити прије изградње вода. Накнадне интервенције у том случају нису економски исплативе, осим у случајевима старих водова на којима се врши системска замјена старих изолатора.

У случају када се заштита дистрибутивног вода од индукованих напона реализује примјеном линијских одводника пренапона они се не постављају на сваком стубу вода, него на неком растојању. Оптимално растојање између сусједних одводника првенствено зависи од подносивог напона изолације вода, тј. максималне амплитуде индукованих напона које вод може да поднесе. На водовима са вишим подносивим напоном изолације растојање између линијских одводника пренапона може бити веће. Предложена оптимална растојања између сусједних линијских одводника пренапона у истој фази у случају њихове примјене за заштиту водова од индукованих напона су сљедећа:

1. Према [61] оптимално растојање износи 200 m.
2. Према [59],[108], оптимално растојање износи 200 m.
3. Према [114] потпуна елиминација могућности испада вода из погона се може постићи уградњом линијских одводника пренапона на растојању од 150 m. Растојање од 360 m је предложено као оптимално.
4. Према [115] уградњом линијских одводника пренапона на растојању од 300 m елиминисани су исподи из погона 10 km дугог 11 kV вода у Јужноафричкој републици узроковани индукованим напонима.

Узимајући у обзир претходно речено може се усвојити да оптимално растојање између сусједних линијских одводника пренапона уграђених у истој фази вода износи око 200 m. С обзиром да се линијски одводници уграђују на стубовима штићеног вода тачно растојање између њих ће зависити од дужина распона вода. У случају када се користе за заштиту вода од индукованих напона линијски одводници пренапона се уграђују по принципу један стуб један одводник, с тим што се на сваком сљедећем стубу штити друга фаза. Нпр. на првом стубу се штити фаза L1, на сљедећем стубу фаза L2, на сљедећем стубу фаза L3, на сљедећем стубу опет фаза L1 и тако редом. При томе се предложено растојање од 200 m односи на растојање између два сусједна линијска одводника пренапона у истој фази (у овом случају то је растојање између првог и четвртог

стуба). Предложени инсталациони интервал линијских одводника пренапона се може модификовати у зависности од експлоатационих искустава. Смањење инсталационог интервала води до смањења висине индукованих напона на штићеном воду и до бољег квалитета заштите. Важи и обрнуто.

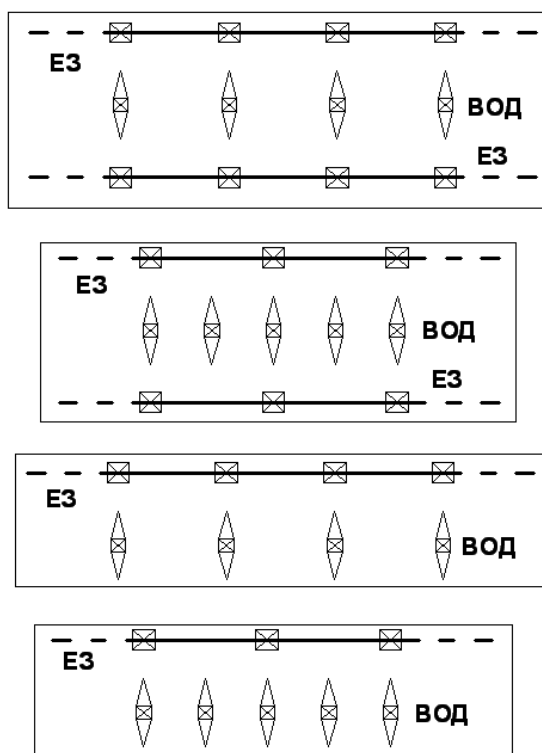
Екстерни систем заштите је предложен да се користи на кратким дионицама вода или на кратким водовима. Због тога потребан број линијских одводника пренапона није велики и нема значајнији утицај на цијену заштите. Енергетско напрезање линијских одводника пренапона приликом дјеловања индукованих напона је мало. Због тога се могу користити јефтинији линијски одводници са нижом енергетском апсорбционом моћи. Ако се екстерни систем заштите користи на прилазном воду у постројење онда одводници пренапона постављени на улазу у постројење замјењују један сет линијских одводника пренапона.

6.3.6. Могуће конфигурације екстерних стубова дуж трасе вода

Највећи недостатак екстерног система заштите је висока цијена изградње. Једини начин да се осјетније смање инвестициони трошкови јесте кориштење мањег броја екстерних стубова. Ово се може урадити на четири основна начина који су илустровани на слици 6.22. Стандардни дистрибутивни водови имају знатно краће распоне од преносних водова тако да постоји могућност да се користе дужи распони између екстерних стубова у односу на распоне штићеног вода. У случају када је распон између екстерних стубова два пута дужи од распона између стубова штићеног вода могуће је редуковати број потребних екстерних стубова за 50%. Исти степен смањења потребног броја екстерних стубова се може остварити примјеном само једног екстерног заштитног ужета, а при истој дужини распона штићеног вода и распона између екстерних стубова. Најмањи број екстерних стубова се користи у случају реализације екстерног система заштите са једним заштитним ужетом и са распонима између екстерних стубова који су два пута дужи од распона између стубова штићеног вода. У овом случају потребан број екстерних стубова је смањен за 75% у односу на оригиналну конфигурацију.

Битно је нагласити да ће екстерна заштитна ужад на дужим распонима имати већи угиб па је неопходно користити стубове веће висине како би ужад и даље

ефикасно екранирала штићени вод. Одлука о оптималној конфигурацији екстерног система заштите се мора донијети на бази техничко-економске анализе.



Слика 6.22 – Могуће конфигурације екстерног система заштите дуж трасе штићеног дистрибутивног вода

6.4. Дискусија

Примјена екстерног система заштите надземних водова од атмосферских пражњења је предложена у стандарду IEEE 1243-1997 [22]. Наглашено је да овај систем заштите има високу цијену реализације, али да може да обезбједи одличну заштиту критичног вода од атмосферских пражњења.

Екстерни систем заштите није предложен за широку употребу, него за специјалне случајеве у којима други системи заштите не показују задовољавајуће карактеристике. Погодан је за заштиту кратких, веома угрожених и веома важних надземних водова.

Линијски одводници пренапона у већини случајева представљају оптимално рјешење за заштиту угрожених надземних водова од атмосферских пренапона. У поглављу 5 је показано да најкритичнији надземни водови могу ефикасно бити штићени од атмосферских пренапона једино примјеном линијских одводника пренапона на сваком стубу и у свакој фази вода. Алтернатива примјени линијских

одводника пренапона у таквим случајевима је екстерни систем заштите. Основне предности екстерног система заштите у односу на друге системе заштите су:

1. Може у дугом временском периоду и уз минимално одржавање да елиминише испаде штићеног вода из погона који су узроковани атмосферским пражњењима.
2. Висок квалитет заштите може да се обезбједи и за вод који је изграђен на тлу велике специфичне електричне отпорности и у области са веома израженом грмљавинском активношћу.
3. Ефикасност овог система заштите је константна током цијелог експлоатационог периода, за разлику од линијских одводника пренапона који морају редовно да се одржавају како би се осигурао висок степен заштите.
4. Трошкови одржавања су нижи, а ефикасност и поузданост овог система заштите су бољи у поређењу са заштитом која се базира на примјени линијских одводника пренапона.
5. Вод је заштићен од директних атмосферских пражњења у фазне проводнике, као и од прескока у распону без обзира на дужину међуфазних растојања.

Екстерни систем заштите се предлаже за примјену у сљедећим случајевима:

1. Заштита улазних распона надземног вода у високонапонска постројења. У том случају у постројењу се појављују само индуковани напони који имају малу амплитуду и енергију и који нису опасни по изолацију опреме. То значи да екстерни систем заштите истовремено штити вод од испада из погона, али и опрему у постројењу од атмосферских пренапона. Тиме се омогућава изградња постројења са нижим подносивим напоном изолације што значајно снижава његову цијену.
2. Заштита улазних распона вода у нисконапонске или средњенапонске објекте. Заштитна улога екстерног система заштите је иста као у претходном случају. Ипак, у нисконапонским и средњенапонским објектима се често налази скупа и на пренапоне осјетљива опрема. Заштиту такве опреме није једноставно пројектовати у случајевима када је

прилазни вод изграђен на тлу велике специфичне електричне отпорности и у области са израженом грмљавинском активношћу.

3. Заштита надземних кабловских водова од директних атмосферских пражњења. Свако директно атмосферско пражњење у надземни кабл би изазвало уништење његове изолације у околини мјеста пражњења. У случају трожилних или вишежилних каблова то би изазвало трајни испад вода из погона.
4. Заштита дистрибутивних надземних водова од прескока у распону.
5. Заштита надземних водова од директних атмосферских пражњења у фазне проводнике мимо заштитних ужади.
6. Заштита распона преносних водова који су без заштитног ужета (нпр. распони на прелазу ријека, кањона и слично). Линијски одводници пренапона на таквим распонима трпе велика енергетска напрезања тако да постоји велика вјероватноћа да дође до њиховог термичког уништења.
7. Заштита средњенапонских постројења у мрежама са изолованом неутралном тачком може бити компликован задатак, поготово ако је прилазни вод грађен на каменитом тлу или у области са израженом грмљавинском активношћу. Наиме, да би се спријечила термичка уништења линијских одводника пренапона усљед дјеловања високих привремених пренапона који се јављају приликом једнофазног земљоспоја у таквим мрежама се користе одводници пренапона са високим називним напоном. Такви одводници не могу да обезбједе квалитетну заштиту опреме у постројењу.
8. Екстерни систем заштите је погодан за примјену у случајевима када се захтјева минимално одржавање заштите у дужим временским периодима.

Најзначајнији недостаци екстерног система заштите су сљедећи:

1. Висока цијена изградње заштите. У ову цијену је укључена цијена земљишта у околини штићеног вода на коме ће се градити екстерни систем заштите, затим трошкови изградње заштите (транспорт, рад машина, радници итд.) и трошкови за утрошени материјал (екстерни стубови и њихови уземљивачи, громобранска ужад итд).

2. Заштита није погодна за водове са високим стубовима јер у том случају висина екстерних стубова постаје неприхватљиво велика.
3. Екстерни систем заштите је нов тако да не постоје експлоатациона искуства са његовом изградњом и димензионисањем.

Главни закључак који се може извести о екстерном систему заштите је да може да обезбједи веома висок квалитет заштите угрожених надземних водова од атмосферских пражњења. У случају примјене на улазним распонима вода испред критичног објекта, екстерни систем заштите истовремено штити и вод од испада из погона, али и опрему у објекту од атмосферских пренапона који долазе по прилазном воду. Највећи недостатак екстерног система заштите је висока цијена реализације. Она је највјероватнији разлог због кога овај систем заштите до данас није кориштен.

7. Закључак

У овој докторској дисертацији је обрађена проблематика заштите дистрибутивних и преносних надземних водова од атмосферских пренапона који су последица директних пражњења у водове. Ефикасна заштита дистрибутивних водова од ове врсте пренапона осигурава и ефикасну заштиту од индукованих напона на фазним проводницима вода који су последица атмосферских пражњења у околно тло. Разлог томе је што индуковани напони имају знатно мању енергију и амплитуду у поређењу са пренапонима који су последица директних пражњења у водове.

У сврху заштите надземних водова од атмосферских пренапона може се користити велики број различитих стандардних и специјалних система заштите. Стандардни системи заштите се користе на сваком воду који се жели штитити од атмосферских пренапона. На критичним водовима, који упркос примјени стандардних система заштите имају велики број испада из погона узрокованих дјеловањем атмосферских пренапона, морају се додатно примјенити и неки од специјалних система заштите. Најчешће се користе линијски одводници пренапона јер имају релативно једноставан процес уградње на постојећи вод, ниску цијену и високу ефикасност и поузданост. Постоје и многи други специјални системи заштите који се могу користити у специфичним случајевима када линијски одводници пренапона не представљају оптимално рјешење. Од свих тих система заштите најбоље карактеристике имају земљоводна ужад. Она такође имају ниску цијену реализације и једноставну процедуру уградње. Значајне предности земљоводног ужета у односу на линијске одводнике пренапона јесу мања потреба за одржавањем и већа поузданост.

Ефикасност примјене стандардних и специјалних система заштите на надземним водовима је анализирана примјеном нумеричких прорачуна у програмском пакету ЕМТР-АТР. Прорачуни су рађени за 10 kV и 35 kV дистрибутивне водове, односно за 110 kV и 220 kV преносне водове. Отпорност уземљења стубова је варирана у широком опсегу од 10 Ω до 250 Ω . Еквивалентне шеме система су креиране примјеном оптималних модела елемената. Избор оптималних модела за прорачуне је урађен анализом њиховог парцијалног и кумулативног утицаја на добијене резултате. Примјена оптималних модела

елемената у прорачунима је значајна јер омогућава креирање једноставнијих еквивалентних шема, уз истовремено осигуравање веће тачности и поузданости добијених резултата.

Ефикасност стандардних и специјалних система заштите на надземним водовима са великом отпорности уземљења стубова је ниска. Порастом изолационог напона вода ефикасност заштите расте. Високо ефикасна заштита критичних и веома важних водова са може реализовати примјеном линијских одводника пренапона који се постављају у свим фазама и на сваком стубу штићеног дијела трасе вода. Овакав начин заштите може у потпуности да елиминира испаде вода из погона који су узроковани дјеловањем атмосферских пренапона без обзира на вриједност отпорности уземљења стубова и изолациони ниво вода. Ипак, ради оптимизације заштите са техничко-економског становишта најчешће се врши парцијална уградња линијских одводника пренапона у неким фазама и на појединим критичним стубовима дуж трасе вода. У специфичним случајевима, када линијски одводници пренапона не представљају најбоље рјешење, алтернатива њиховој примјени могу бити други специјални системи заштите, првенствено земљоводна ужад. На 10 kV водовима земљоводно уже има приближно једнаку ефикасност као уградња једног линијског одводника по фази сваког стуба, док је на 35 kV, 110 kV и 220 kV водовима ефикасност земљоводног ужета приближно једнака као уградња два линијска одводника пренапона по фази сваког стуба.

У дисертацији је предложен и детаљно анализиран и екстерни систем заштите. То је потпуно нов систем заштите чија је улога да штити вод од атмосферских пражњења. Сви остали системи заштите се базирају на претпоставци да је директно атмосферско пражњење у вод неминовно, а улога заштите је да ограничи амплитуду и трајање атмосферских пренапона. Екстерни систем заштите се реализује примјеном громобранских ужади која се постављају на засебне стубове који се налазе са једне или са обје стране штићеног вода, у зависности од димензија његових стубова. Методологија димензионисања екстерног система заштите је детаљно презентована и за дистрибутивне и за преносне надземне водове. Неке од прорачунатих димензија су експериментално верификоване у Лабораторији за високи напон. Предложене димензије заштите су

примјењиве на било који надземни вод без обзира на његов подносиви напон изолације, отпорност уземљења стубова, димензије и друге карактеристике. Највећи недостатак екстерног система заштите је висока цијена реализације. То је и главни разлог што овај систем заштите до сад није детаљније анализиран и практично примјењиван.

Даља истраживања у области заштите надземних водова од атмосферских пражњења и пропратних пренапона подразумјевају развој методе којом могу да се прорачунају индуковани напони на фазним проводницима штићеног дистрибутивног вода у случају када се атмосферско пражњење одвија у екстерни систем заштите. Такође, потребно је анализирати и могућности примјене специјалних система заштите у сврху смањења енергетског напрезања линијских одводника пренапона на дистрибутивним водовима који се налазе у областима гдје је честа појава позитивних атмосферских пражњења.

8. Литература

- [1] R. D. Mershon. The Grounded Wire as a Protection against Lightning, Transactions of the AIEE, Vol. XXII, pp. 331-336, 1903.
- [2] R. Norman. Lightning-Rods and Grounded Cables as a Means of Protecting Transmission Lines against Lightning, Transactions of the AIEE, Vol. XXVI, Issue 2, pp. 1239-1248, 1907.
- [3] L. C. Nicholson. A practical method of protecting insulators from lightning and power arc effects, Proceedings of the AIEE, Vol. 29, Issue 3, pp. 241-266, 1910.
- [4] A. J. Wurts. Discriminating Lightning Arresters, and Recent Progress in Means for Protection Against Lightning, AIEE Trans, Vol. XI, pp. 337-395, 1894.
- [5] P. Torchio. Note on Lightning-Arresters on Italian High-Tension Transmission Lines, Transactions of the AIEE, Vol. XXIV, pp. 945-949, 1905.
- [6] N. J. Neall. Performance of Lightning-Arresters on Transmission Lines, Transactions of the AIEE, Vol. XXIV, pp. 951-981, 1905.
- [7] J. C. Smith. Some experiences with lightning protective apparatus, Proceedings of the AIEE, Vol. 24, Issue 10, pp. 985-994, 1905.
- [8] K. B. McEachron. Thyrite A New Material for Lightning Arresters, Transactions of the AIEE, Vol. 49, Issue 2, pp. 410-417, 1930.
- [9] Line Arrester Applications, International Conference cum Tutorial on HV SA Technology & Applications, New Delhi, Bengt Johnnerfelt, November 2012.
- [10] J. S. Kwak, J. W. Woo, E. B. Shim, H. J. Kim, J. D. Moon . Application of arrester to double circuit transmission line to enhance lightning performance and introduction about the obtained lightning waveforms by monitoring systems, 19th International Lightning Detection Conference 24-25 April and 1st International Lightning Meteorology Conference 26-27 April, Tucson, Arizona, USA, 2006.
- [11] S. Furukawa, O. Usuda, T. Isozaki, T. Irie. Development and application of lightning arresters for transmission lines, IEEE Transaction on Power Delivery, Vol. 4, No. 4, pp. 2121–2129, Oct. 1999.
- [12] Several Questions in the Design of Lightning Protection of 500-kV Transmission Lines, Wuhan High Voltage Research Institute, China, 1982.

- [13] C. T. Gaunt, L. M. Mswane. Lightning Performance Improvement of the Swaziland Electricity board Transmission System (132 kV and 66 kV). Cigre 4th Southern Africa Regional Conference, Cape Town, October 2001.
- [14] U. J. Minnaara, C. T. Gauntb, F. Nicolls. Characterisation of power system events on South African transmission power lines, *Electric Power Systems Research*, Vol. 88, pp. 25-32, 2012.
- [15] D. Karlsson, P. Norberg. Earthing of 130 kV power lines-effects on dependability and line cost, *IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition*, Vol. 2, pp. 609–614, Atlanta, USA, 2001.
- [16] C. R. Torres, F. M. Fonseca. Field Experience on the Application of Surge Arresters on Transmission Lines, *IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exposition*, pp. 1-5, New Orleans, LA, USA, April 2010.
- [17] A. Xemard, S. Sadović, M. Mesić, A. Guerrier, T. Sadović. Study of the flashover rate of a line totally equipped with line arresters, Paper 02, *CIGRE C4 Colloquium on Power Quality and Lightning*, Sarajevo, Bosnia and Herzegovina, May, 2012.
- [18] M. Jacobs. 13 of the Largest Power Outages in History-and What They Tell Us About the 2003 Northeast Blackout, *The Equation - a blog on independent science + practical solutions*, August 8, 2013. (<http://blog.ucsusa.org/2003-northeast-blackout-and-13-of-the-largest-power-outages-in-history-199>)
- [19] https://en.wikipedia.org/wiki/1999_Southern_Brazil_blackout
- [20] M. Puharić, M. Mesić, S. Piliškić, M. Mijoč. The Overvoltage Protection of the 110 kV Overhead Lines of the Island of Brač by the Line Surge Arresters' Application, *CIGRE C4 Colloquium on Lightning and Power Systems*, paper 33, Lyon, France, May, 2014.
- [21] Студија - Примена пренапонске заштите преносних надземних водова високог напона у циљу смањења броја кварова услед атмосферских пренапона, Електротехнички факултет у Београду. Инвеститор: Јавно предузеће Електро mreжа Србије, 2013.
- [22] IEEE Std 1243-1997, IEEE Guide for Improving the Lightning Performance of Transmission Lines, 26 June 1997.

- [23] M. S. Savic. Medium Voltage Distribution Systems Lightning Performance Estimation, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 18, No. 3, pp. 910-914, July 2003.
- [24] <http://www.gromobrani.co.rs/uploads/useruploads/Slike/Izokerauni%C4%8Dkakarta-Srbije.png>
- [25] H. D. Betz, U. Schumann, P. Laroche. Lightning: Principles, Instruments and Applications - Review of Modern Lightning Research, Springer, January 2009.
- [26] G. Anderson, D. Klugmann. A European lightning density analysis using 5 years of ATDnet data, Natural Hazards and Earth System Sciences, Vol. 14, pp. 815–829, 2014.
- [27] http://science.nasa.gov/science-news/science-at-nasa/2001/ast05dec_1/
- [28] <https://www.scalar.si/en/>
- [29] <https://www.nowcast.de/en.html>
- [30] G. Milev, G. Lakota. High resolution flash density map for Croatia and Bosnia and Herzegovina, CIGRE C4 Colloquium on Power Quality and Lightning, Sarajevo, Bosnia and Herzegovina, 13-16 May, 2012, Paper 26.
- [31] V. Javor, H. D. Betz. Flash Density Maps of Serbia for 2008-2013, Serbian Journal of Electrical Engineering, Vol. 11, No. 4, pp. 629-647, 2014.
- [32] Y. Li, Q. Yang, W. Sima, J. Li and T. Yuan. Optimization of Transmission-Line Route Based on Lightning Incidence Reported by the Lightning Location System, IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 28, No. 3, pp. 1460 - 1468, 2013.
- [33] IEEE Std 1410-2010, IEEE Guide for Improving the Lightning Performance of Electric Power Overhead Distribution Lines, January 2011.
- [34] CIGRE Working Group C4.301: Use of Surge Arresters for Lightning Protection of Transmission Lines, CIGRE Technical Brochure No. 440, 2010.
- [35] A. Xémard, S. Denetière, J. Michaud, P. Y. Valentin, Q. Bui-Van, A. Dutil, M. Giroux, J. Mahseredjian. Methodology for the calculation of the lightning flashover rate of a line with or without line surge arresters, CIGRE 2006, pp. No C4-101.
- [36] <http://www.tdee.ulg.ac.be/doc-32.html>
- [37] <http://www.inmr.com/switching-lightning-protection-overhead-lines-using-externally-gapped-line-arresters/>

- [38] P. N. Mikropoulos, T. E. Tsovilis. Estimation of the shielding performance of overhead transmission lines: the effects of lightning attachment model and lightning crest current distribution, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, Vol. 19, No. 6, pp. 2155–2164, 2012.
- [39] J. He, Y. Tu, R. Zeng, J. B. Lee, S. H. Chang, Z. Guan. Numerical analysis model for shielding failure of transmission line under lightning stroke, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 20, No. 2, pp. 815–822, 2005.
- [40] B. Wei, Z. Fu, H. Yuan. Analysis of lightning shielding failure for 500 kV overhead transmission lines based on an improved leader progression model, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 24, No. 3, pp. 1433–1440, 2009.
- [41] F. A. M. Rizk. Modeling of transmission line exposure to direct lightning strokes, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 5, No. 4, pp. 1983 – 1997, October 1990.
- [42] F. Chun-lei, W. Guang-ning, L. Rui-fang. Study on Shielding Failure Flashover Rate for EHV Transmission Line, *International Conference on High Voltage Engineering and Application 2008 (ICHVE)*, pp. 172- 175, Chongqing, 2008.
- [43] International Standard IEC 62305-1, Protection against lightning – Part 1: General principles, First edition, 2006-01.
- [44] A. J. Eriksson. An improved electrogeometric model for transmission line shielding analysis, *IEEE Transaction on Power Delivery*, Vol. PWRD-2, July 1987.
- [45] Working group IEEE: A Simplified Method for Estimating Lightning Performance of Transmission Lines; *IEEE Tran. on Power App. and Systems*, Vol. PAS-104, No.4, pp 919-927, April 1985.
- [46] A. M. Mousa, K. D. Srivastava. A Revised Electrogeometric Model for the Termination of Lightning Strokes on Grounded Objects, *Proceedings of International Aerospace Conference on Lightning and Static Electricity*, Oklahoma City, pp. 342-352, April 1988.
- [47] C. F. Wagner, G. D. Mccann, G. L. MacLane. Shielding of Transmission Lines. *AIEE Transactions*, Vol. 60, Issue 6, pp. 313-328, June 1941.
- [48] Protection against lightning – Part 3: Physical damage to structures and life hazard, International Standard IEC 62305-3, First edition, 2006-01.

- [49] W. S. Price, S. C. Bartlett, E. S. Zobel. Lightning and Corona Performance of 330 kV Lines on the American Gas and Electric and Ohio Valley Electric Corporation Systems. AIEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. 75, Issue 3, pp. 583-597, August 1956.
- [50] F. S. Young, J. M. Clayton, A. R. Hileman. Shielding of Transmission Lines, AIEE Trans, 61S, pp. 132-154, 1951.
- [51] C. F. Wagner, A. R. Hileman. The Lightning Stroke - 2, AIEE Trans. on PA&S, pp. 622-642, October 1961.
- [52] H.R. Armstrong, E. Whitehead. Field and Analytical Studies on Transmission Line Shielding; IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, VOL.PAS-87, No 1, pp.270-281, January 1968.
- [53] G. E. Brown, E. R. Whitehead. Field and Analytical Studies of Transmission Line Shielding - 2, IEEE Transaction on PA&S, pp. 617-626, 1969.
- [54] E. R. Love. Improvements on the Lightning Stroke Modeling and Application to Design of EHV and UHV Transmission Lines, M. Sc. thesis, University of Colorado, 1973.
- [55] IEEE Working Group Report: Estimating Lightning Performance of Transmission Lines II - Updates to Analytical Models, IEEE Trans. On Power Delivery, Vol. 8, Issue 3, pp. 1254-1267, July 1993.
- [56] М. Бањанин. Утицај амплитуде струје атмосферског електричног пражњења и угиба ужета на величину атрактивне зоне далековода, Завршни рад, Електротехнички факултет у Источном Сарајеву, 2011.
- [57] Z. G. Datsios, P. N. Mikropoulos, T. E. Tsovilis. Estimation of the minimum shielding failure flashover current for first and subsequent lightning strokes to overhead transmission lines, Electric Power Systems Research, Vol. 113, pp. 141–150, August 2014.
- [58] A. Piantini. Lightning protection of overhead power distribution lines. In: 29th International Conference on Lightning Protection, June 2008, Uppsala, Sweden.
- [59] S. Yokoyama. Designing concept on lightning protection of overhead power distribution line. IX International Symposium on Lightning Protection, November 2007 – Foz do Iguaçu, Brazil.

- [60] M. Mobedjina, L. Stenström. Improved transmission line performance using polymer-housed surge arresters, CEPSE Seminar, Manila, Philippines, October, 2000.
- [61] M. Paolone, C. A. Nucci, F. Rachidi, E. Petrache, Mitigation of Lightning-Induced Overvoltages in Medium Voltage Distribution Lines by Means of Periodical Grounding of Shielding Wires and of Surge Arresters: Modeling and Experimental Validation, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 19, No. 1, pp. 423–431, Jan. 2004.
- [62] S. Yokoyama. Experimental analysis of earth wires for induced lightning surges, IEE Generation, Transmission and Distribution, Vol. 127, No. 1, pp. 33-40, January 1980.
- [63] S. Visacro. A comprehensive approach to the grounding response to lightning currents. IEEE Transaction on Power Delivery, Vol. 22, No. 1, pp. 381–386, January 2007.
- [64] З. Стојковић: Пројектовање помоћу рачунара у електроенергетици - примена програмских алата, Монографија, Електротехнички факултет, Београд, Академска мисао, Београд, јул 2009.
- [65] A. C. Liew, M. Darveniza. Dynamic model of impulse characteristic of concentrated earths, Proceedings of the Institution of Electrical Engineers, Vol. 121, No. 2, pp. 123–135, February 1974.
- [66] Z. Stojković. The soil ionization influence on the lightning performance of transmission lines, Electrical engineering, Archiv fur elektrotechnik, Vol. 82, No. 1, pp. 49-58, September 1999.
- [67] M. Veledar, Z. Bajramović, S. Čaršimamović, M. Savić, O. Hadžić. Overhead line tower's foundation type A impulse grounding resistance, Cigre 45th Session, Paris, 24-29 August 2014.
- [68] J. He, R. Zeng, B. Zhang. Methodology and Technology for Power System Grounding, John Wiley & Sons, First edition, Singapore, 2013.
- [69] J. L. He, R. Zeng, Y. P. Tu, J. Zou, S. M. Chen, Z. C. Guan. Laboratory investigation of impulse characteristics of transmission tower grounding devices, IEEE Transaction on Power Delivery, Vol. 18, Ho.3, pp. 994 - 1001, July 2003.

- [70] J. L. He, Y. Q. Gao, R. Zeng, Jun Zou, X. D. Liang, B. Zhang, J. B. Lee, S. H. Chang. Effective length of counterpoise wire under lightning current, IEEE Transaction on Power Delivery, Vol. 20, No. 2, pp. 1585 - 1591, April 2005.
- [71] A. Soares, Jr., S. Visacro. Lightning response of typical Brazilian transmission line tower-footing arrangements, International Conference on Grounding and Earthing, pp. 98–102, Brazil, 1998.
- [72] S. Visacro, F. H. Silveira, A. De Conti. The Use of Underbuilt Wires to Improve the Lightning Performance of Transmission Lines, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 27, No. 1, pp. 205-213, January 2012.
- [73] S. Yokoyama, A. Asakawa. Experimental Study of Response of Power Distribution Lines to Direct Lightning Hits, IEEE Transaction on Power Delivery, Vol. PWRD-4, No.4, pp.2242-2248, 1989.
- [74] S. Visacro, F. H. Silveira. Lightning Performance of Transmission Lines: Methodology to Design Grounding Electrodes to Ensure an Expected Outage Rate, IEEE Transaction on Power Delivery, Vol. 30, No. 1, pp. 237-245, February 2015.
- [75] I. F. Gonos, L. Ekonomou, F. V. Topalis, I. A. Stathopoulos. Probability of backflashover in transmission lines due to lightning strokes using Monte-Carlo simulation. Electrical Power and Energy Systems, Vol 25, pp. 107–111, 2003.
- [76] W. R. Jones. Bentonite rods assure ground rod installation in problem soils, IEEE Transaction on Power Delivery, Vol. PAS 99, pp. 1343-1346, July 1980.
- [77] M. B. Kostic, Z. R. Radakovic, N. S. Radovanovic, M. R. Tomasevic-Canovic. Improvement of electrical properties of grounding loop by using bentonite and waste drilling mud, IET Generation Transmission and Distribution, Vol.146, No. 1, pp. 1-6, January 1999.
- [78] Y. P. Tu, J. L. He, R. Zeng. Lightning impulse performances of grounding devices covered with low-resistivity materials, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 21, No. 3, pp. 1706–1713, July 2006.
- [79] Insulation co-ordination - Part 1: Definitions, principles and rules, International Standard IEC 60071-1, Eight edition, 2006-01.
- [80] IEEE Std 1410-2004, IEEE Guide for Improving the Lightning Performance of Electric Power Overhead Distribution Lines, July 2004.

- [81] M. Kawai, H. Azuma. Design and Performance of Unbalanced Insulation in Double Circuit Transmission Lines, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. 84, Issue 9, pp. 839-846, September 1965.
- [82] M. Hayashi, M. Kobayashi. Innovation on Power and Energy Technology Developing the First Gapless Metal Oxide Surge Arrester (MOSA) in the World, 2008.
(http://www.arresterworks.com/history/hall_fame_pdf/developing_mosa_misao_kobayashi.pdf)
- [83] <https://library.e.abb.com/public/99996453b441eaa7c1257d23002f1b5a/Surge%20Arrester%20Buyers%20Guide%20-%20Edition%2011%202014-05%20-%20English%20-%201HSM%209543%2012-00en.pdf>
- [84] http://www.energy.siemens.com/co/pool/hq/power-transmission/high-voltage-products/surge-arresters-and-limiters/Line%20surge%20arresters/Line_Surge_Arrester_en.pdf
- [85] A. Xémard, S. Denetière, J. Michaud, P. Y. Valentin, Q. Bui-Van, A. Dutil, M. Giroux, J. Mahseredjian. Methodology for the calculation of the lightning flashover rate of a line with or without line surge arresters, CIGRE 2006, paper No C4-101, Paris.
- [86] R. Shariatinasab, B. Vahidi, S. H. Hosseinian, A. Ametani. Probabilistic Evaluation of Optimal Location of Surge Arresters on EHV and UHV Networks Due to Switching and Lightning Surges, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 24, No. 4, October 2009.
- [87] E. J. Tarasiewicz, F. Rimmer, A. S. Morched. Transmission Line Arrester Energy, Cost, and Risk of Failure Analysis for Partially Shielded Transmission Lines, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 15, No. 3, July 2000.
- [88] J. A. Martinez, F. Castro-Aranda. Lightning Flashover Rate of an Overhead Transmission Line Protected by Surge Arresters. IEEE Power Engineering Society General Meeting, pp. 1-6, Tampa, Florida, USA, 2007.
- [89] <http://www.hubbellpowersystems.com/literature/arresters/trans/EU1413.pdf>
- [90] J. L. De Franco, A. C. G. Bezerra, A. D. Andrade. Improvement of the Transmission Lines Lightning Performance Using Line Arresters: Experience of the Brazilian Utilities. Paper A3-102, CIGRE 2006, Paris.

- [91] F. De la Rosa F., R. Velazquez. Application of MOSA in T&D Systems in Mexico. IEEE T&D Conference Proceedings, pp. 248-254, Los Angeles, CA., September 1996.
- [92] G. Enriquez, R. Velazquez R., C. Romualdo. Mexican experience with the application of transmission line arresters, paper C4-106, CIGRE 2006, Paris.
- [93] Lightning Field Performance of 230 and 400 kV Transmission Lines with Surge Arresters, IIE, Internal project report 13153, November 2006, (in Spanish).
- [94] M. Mesić, J. Radovanović, D. Škarica, S. Sadović. The experience from operation of the overhead line 110 kV Ston-Komolac equipped with line surge arresters, CIGRE C4 Colloquium on Power Quality and Lightning, Sarajevo, Bosnia and Herzegovina, Paper 08, May, 2012.
- [95] M. Puharić, M. Mesić, M. Lovrić, J. Radovanović, S. Sadović. Lightning Performance Improvement of 123 kV Line Ston – Komolac by Use of Line Surge Arresters, International Colloquium „Application of Line Surge Arresters in Power Distribution and Transmission Systems“, Cavtat, Dubrovnik, 2008.
- [96] M. Mesić, M. Puharić, D. Škarica. Application of Line Surge Arrestors in protection of the 110 kV Ston-Komolac Transmission Line From Atmospheric Discharges, Energija 57, pp. 408-423, 2008/4.
- [97] M. Mesić, J. Radovanović, D. Škarica, S. Sadović. Improving of Reliability Overhead Line 110 kV Ston – Komolac by Line Surge Arrester Installation, Colloquium on Lightning and Power Systems, Kuala Lumpur, 16-19 May, 2010.
- [98] M. Mesić, J. Radovanović, D. Škarica, S. Sadovic. The expirience by using of line surge arresters due to protection overhead line 110 kV Ston – Komolac against lightning, 10th Session HRO CIGRE, Cavtat 2011.
- [99] A. R. Hileman. Insulation Coordination for Power Systems, CRC Press, Taylor & Francis Group, 1999.
- [100] S. Sadovic, D. Lepley, E. Brocard, J. M. George. Line Surge Arresters Use on the Compact Lines Having Underbuilt Distribution Circuit on the Same Tower, CIGRE C4 Colloquium on Power Quality and Lightning, Sarajevo, Bosnia and Herzegovina, Paper 16, May, 2012.

- [101] S. Sadovic, G. Couret, Z. Abidin, M. Puharic, L. Peter. Quality of Service Improvement of the Compact Lines by the Use of Line Surge Arresters, CIGRE 5th Southern Africa Regional Conference, Cape Town, South Africa, 2005.
- [102] T. Shigeno. Experience and Effectiveness of Application of Transmission Line Arresters, IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition: Asia Pacific, Vol.1, pp. 636 – 639, 2002.
- [103] J. He, S. Chen, R. Zeng, J. Hu, C. Deng. Development of Polymeric Surge ZnO Arresters for 500-kV Compact Transmission Line, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 21, No. 1, Jan. 2006.
- [104] C. Potvin, W. Chisholm, P. Prud'homme, M. Farzaneh, D. Lepley, E. Del Bello. Laboratory testing of EGLA and NGLA under icing and dry conditions for Hydro-Québec TransÉnergie transmission system application, CIGRE C4 Colloquium on Power Quality and Lightning, Sarajevo, Bosnia and Herzegovina, Paper 10, May, 2012.
- [105] P. Prud'homme, B. Thériault, D. Lepley, E. Del Bello, C. Potvin, B. Panaroni, S. Bastien. Pilot project of the first installation of externally gapped line arresters on Hydro-Québec TransÉnergie transmission system, CIGRE C4 Colloquium on Power Quality and Lightning, Sarajevo, Bosnia and Herzegovina, Paper 11, May, 2012.
- [106] CIGRE Working Group C4.402: Protection of Medium Voltage and Low Voltage Networks against Lightning, Part 2: Lightning protection of Medium Voltage Networks, CIGRE Technical Brochure No. 441, 2010.
- [107] Д. Јаковчић, Д. Мишковић, Д. Гамбалета. Искуства употребе линијских одводника пренапона у сврху смањења атмосферских пренапона на средњенапонским надземним водовима, Хрватски огранак међународне електродистрибуцијске конференције CIRED, 2. (8.) савјетовање, Умаг, 16–19. мај 2010, рад SO1–12.
- [108] S. Yokoyama. Distribution Surge Arrester Behavior due to Lightning Induced Voltages. IEEE Power Engineering Review, Vol. PER-6, No. 1, pp. 47-48, January 1986.

- [109] K. Nakada, S. Yokoyama, T. Yokota, A. Asakawa T. Kawabata. Analytical Study on Prevention Methods for Distribution Arrester Outages Caused by Winter Lightning, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 13, No. 4, pp. 1399-1404, October 1998.
- [110] K. Nakada, T. Yokota, S. Yokoyama, A. Asakawa, M. Nakamura, H. Taniguchi, A. Hashimoto. Energy absorption of surge arresters on power distribution lines due to direct lightning strokes-effects of an overhead ground wire and installation position of surge arresters, IEEE Transaction on Power Delivery, Vol. 12, No. 4, pp. 1779-1785, October 1997.
- [111] J. Schoene, M. A. Uman, V. A. Rakov, A. G. Mata, C. T. Mata, K. J. Rambo, J. Jerauld, D. M. Jordan, G. H. Schnetzer. Direct Lightning Strikes to Test Power Distribution Lines—Part I: Experiment and Overall Results, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 22, No. 4, October 2007.
- [112] J. Schoene, M. A. Uman, V. A. Rakov, A. G. Mata, C. T. Mata, K. J. Rambo, J. Jerauld, D. M. Jordan, G. H. Schnetzer. Direct Lightning Strikes to Test Power Distribution Lines—Part II: Measured and Modeled Current Division Among Multiple Arresters and Grounds, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 22, No. 4, October 2007.
- [113] V.A. Rakov, C.T. Mata, M.A. Uman, K.J. Rambo, A.G. Mata. Review of Triggered-Lightning Experiments at the ICLRT at Camp Blanding, Florida, IEEE Bologna Power Tech Conference, Bologna, Italy, June 2003.
- [114] T. E. McDermott, T.A. Short, J.G. Anderson. Lightning protection of distribution lines. IEEE Transacion on Power Delivery, Vol. 9, No. 1, pp. 138-152, January 1994.
- [115] H. J. Geldenhuys, C. T. Gaunt. Insulation co-ordination of rural distribution lines. Transactions-South African Institute of Electrical engineering. Vol. 82, pp. 217-217, 1992.
- [116] T.A. Short, R.H. Ammon. Monitoring Results of the Effectiveness of Surge Arrester Spacings on Distribution Line Protection, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 14, No. 3, July 1999, pp. 1142-1150.

- [117] G. V. Podporkin, E. Yu. Enkin, E. S. Kalakutsky, V. E. Pilshikov, A. D. Sivaev. Overhead Lines Lightning Protection by Multi-Chamber Arresters and Insulator-Arresters, IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 26, No. 1, pp. 214-221, 2011.
- [118] G. V. Podporkin, E. Yu. Enkin, E. S. Kalakutsky, V. E. Pilshikov, A. D. Sivaev. Overhead Lines Lightning Protection by Multi-Chamber Arresters and Insulator-Arresters, IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 26, No. 1, pp. 214-221, 2011.
- [119] O. O. Filho, D. R. de Mello, G. S. G. de Oliveira, G. Podporkin, A. Wey. Testing of long flashover arrester designed for distribution lines, IX International Symposium on Lightning Protection, Foz do Iguaçu, Brazil, November 2007.
- [120] G. V. Podporkin, V. E. Pilshikov, E. Yu. Enkin. Lightning Protection of Overhead Distribution and Transmission Lines by Multi-Chamber Arresters and Insulators-Arresters of a Novel Design, CIGRE SC C4 Colloquium, Hakodate, Japan, October 2012.
- [121] G. V. Podporkin, E. Yu. Enkin, E. S. Kalakutsky, V. E. Pilshikov, A. D. Sivaev. Multi-Chamber Arresters and Insulator-Arresters for Lightning Protection of Overhead Distribution and Transmission Lines, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 26, No. 1, pp. 214-221, 2011.
- [122] G. V. Podporkin, A. D. Sivaev. Lightning Protection of Overhead Distribution Lines by Long Flashover Arresters, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 13, No. 3, pp. 814-823, July 1998.
- [123] <http://eng.streamer.ru/lfa-1>
- [124] G. V. Podporkin, V.E. Pilshikov, A. D. Sivaev. Lightning Protection of Medium Voltage Overhead Lines by Modular Long-Flashover Arresters, IEEE Transactions on PowerDelivery, Vol. 18, No. 3, pp.781-787, July 2003.
- [125] G. V. Podporkin, V.E. Pilshikov, A. D. Sivaev, M. Yarmarkin. Lightning Protection of Medium Voltage Overhead Lines with covered conductors by antenna-type long flashover arresters, 17th International Conference on Electricity Distribution – CIRED, Barcelona, May 2003.
- [126] S. Visacro, M. A. Felipe, R. Z. Oliveira. Non-conventional methodology to improve the lightning performance of transmission lines, International Conference on Grounding and Earthing, pp. 267–270, Rio de Janeiro, Brazil, 2002.

- [127] S. Visacro, A. J. Soares, R. Oliveira, M. Felipe, A. Silva, M. H. Vale. Non-conventional measures for improvement of lightning performance of transmission lines, 27th International Conference on Lightning Protection, pp. 684–687, Avignon, France, 2004.
- [128] S. Visacro, E. P. Antunes, V. G. Machado, V. T. Guedes. Improving the lightning performance of 69 kV to 230 kV transmission lines, International Conference on Grounding and Earthing and 2nd International Conference on Lightning Physics Effects, pp. 329–332, Maceió, Brazil, 2006.
- [129] S. Visacro, A. J. Soares. HEM: A model for simulation of lightning-related engineering problems, IEEE Transaction on Power Delivery, Vol. 20, No. 2, pt. 1, pp. 1206–1208, April 2005.
- [130] H. Sugimoto, T. Kosuge, S. Yokoyama, K. Okumura. Study of lightning protection of power distribution lines located in mountainous areas, Transmission and Distribution Conference and Exhibition: Asia Pacific. IEEE/PES, 2002, pp. 677-682.
- [131] C. Zhao, J. Cheng, S. Gu, J. Ruan, X. Li, X. Tong, W. Hu. Research on differentiated lightning protection comprehensive management for the 500-kV power network in the area near the three gorges project. IEEE Transaction on Power Delivery, Vol. 27, Issue 1, pp. 1–16, January 2012.
- [132] M. S. Savić, Z. Stojković. An Expert System for High-Voltage Substation Lightning Performance Estimation, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 7, No. 3, pp. 1223-1231, July 1992.
- [133] M. Banjanin, M. Savić. Specialized software for estimating transmission line and substation lightning performance, International Journal of Electrical Engineering Education, Vol. 52, No. 4, pp. 340–355, October 2015.
- [134] <http://www.sadovic.com/>
- [135] <http://www.emtp-software.com/>
- [136] <http://www.atpdraw.net/>
- [137] <http://www.emtp.org/>
- [138] Canadian-American EMTP User Group: ATP Rule Book, distributed by the European EMTP – ATP Users Group Association, 2011.

- [139] J. G. Anderson. Monte Carlo Computer Calculation of Transmission-Line Lightning Performance, Transactions of the American Institute of Electrical Engineers. Part III: Power Apparatus and Systems, Vol. 80, Issue 3, pp. 414-419, April 1961.
- [140] M. S. Savić. Engineering Method for High-Voltage Substations Lightning Performance Estimation, Proceedings IEE, Vol. 136, Pt. C, No. 4, pp. 222-229, July 1989.
- [141] M. Banjanin, M. Savić. Some aspects of overhead transmission lines lightning performance estimation in engineering practice, International Transactions on Electrical Energy Systems, Vol. 26, Issue 1, pp. 79-93, January 2016.
- [142] S. Visacro, F. H. Silveira: The Impact of the Frequency Dependence of Soil Parameters on the Lightning Performance of Transmission Lines , IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, Vol. 57, No. 3, pp. 434 – 441, January 2015.
- [143] CIGRE Working Group 33.07: Guidelines for the evaluation of the dielectric strength of external insulation, No. 72, Paris 1992.
- [144] Insulation co-ordination - Part 4: Computational guide to insulation co-ordination and modeling of electrical networks, International Standard IEC 60071-4, First edition 2004-06.
- [145] CIGRE Working Group 33.07: Guide to Procedures for Estimating the Lightning Performance of Transmission Lines, CIGRE Technical Brochure No. 63, 1991.
- [146] IEEE Task Force on Fast Front Transients. Modeling guidelines for fast front transients, IEEE Transaction On Power Delivery, Vol. 11, No. 1, pp. 493-506, January 1996.
- [147] CIGRE Working Group C4.501: Guideline for Numerical Electromagnetic Analysis Method and its Application to Surge Phenomena, CIGRE Technical Brochure No. 543, Jun 2013.
- [148] M. Savić, M. Banjanin, S. Tatalović. The comparison of total lightning outages of distribution lines with and without earth wires taking into consideration induced overvoltages, CIGRE C4 Colloquium on Power Quality and Lightning, Sarajevo, Bosnia and Herzegovina, paper 30, 13-16 May, 2012.

- [149] М. Бањанин. Моделовање прескока на далеководу при деловању атмосферских пренапона, Мастер рад, Електротехнички факултет у Београду, септембар 2012.
- [150] М. Бањанин. Моделовање елемената ЕЕС-а за прорачун атмосферских пренапона, Семинарски рад на докторским студијама из предмета Електромагнетни прелазни процеси у ЕЕС-у, ЕТФ Београд, фебруар 2013.
- [151] B. N. Gorin, A. V. Shkilev. Measurements of lightning currents at the Ostankino tower, *Elektrich*, No. 8, pp. 64–65, 1984. (in Russian)
- [152] V. A. Rakov: Transient Response of a Tall Object to Lightning, *IEEE Trans. On Electromagnetic Compatibility*, Vol. 43, No. 4, pp. 654-661, November 2001.
- [153] M. S. Savić. Estimation of the Surge Arrester Outage Rate Caused by Lightning Overvoltages, *IEEE Transaction On Power Delivery*, Vol. 20, No. 1, pp. 116-122, January 2005.
- [154] M. Ishii, E. Ohsaki, T. Kawamura, K. Murotani, T. Kouno, T. Higuchi. Multistory transmission tower model for lightning surge analysis, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 6, No. 3, pp. 1327-1335, July 1991.
- [155] F. Heidler. Analytische Blitzstromfunktion zur LEMP-Berechnung. (in German). 18th International Conference on Lightning Protection (ICLP), pp. 63-66, Munich, Germany, September, 1985.
- [156] D. Lovrić, S. Vujević, T. Modrić. On the estimation of Heidler function parameters for reproduction of various standardized and recorded lightning current waveshapes, *International Transactions on Electrical Energy Systems*, Vol. 23, No. 2, pp. 290–300, 2013.
- [157] С. Стојковић. Техника високог напона - Координација изолације, Технички факултет Чачак, 2011. године,
- [158] М. Бањанин. Атмосферски пренапони на надземним водовима – утицај модела елемената на резултате прорачуна, *INFOTEN-JAHORINA* Vol. 15, март 2016.
- [159] L. V. Bewley: Traveling waves on transmission systems, *Transaction AIEE*, Volume 50, pp. 532 – 550, 1931.

- [160] T. Mozumi N. Nagaoka A. Ametani S. Sekioka. An Empirical Formula for the Surge Impedance of a Grounding Conductor along a Reinforced Concrete Pole in a Distribution Line, Proceedings of IPST 2001 (International Conference on Power System Transients), pp. 603-608, 2001.
- [161] C. F. Wagner, I. W. Gross and B. L. Lloyd: High-Voltage Impulse Tests on Transmission Lines, AIEE Transaction, April 1954, pp. 196-210,
- [162] C. F. Wagner and B. L. Lloyd: Effects of Corona on Traveling Waves, AIEE Transaction, October 1955, pp. 858-872,
- [163] T. Gallagher, I. Dudurych: Model of Corona for an EMTP Study of Surge Propagation along HV Transmission Lines, IEE Proceedings on Generation, Transmission and Distribution, Vol. 151, No. 1, January 2004, pp. 61-66.
- [164] J. R. Marti: Accurate Modelling of Frequency-Dependent Transmission Lines in Electromagnetic Transient Simulations, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-101, No.1, January 1987, pp. 147-157.
- [165] A. Ametani, T. Kawamura: A Method of a Lightning Surge Analysis Recommended in Japan Using EMTP, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 20, No. 2, April 2005.
- [166] C. F. Wagner, A. R. Hileman: A new approach for the calculation of the lightning performance of transmission lines III-a, simplified method: stroke to tower, AIEE Trans. on Powers Apparatus and Systems, Vol 79, October 1960.
- [167] W. A. Chisholm, Y. L. Chow: Lightning Surge Response of Transmission Towers, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-102, No 9, September 1983.
- [168] M. S. Banjanin, M. S. Savic, Z. M. Stojkovic. Lightning protection of overhead transmission lines using external ground wires, Electric Power Systems Research, Vol. 127, pp. 206–212, October 2015.
- [169] L. Dubé: MODELS in ATP, language manual, February 1996.
- [170] З. Стојковић, Д. Саламон, С. Јокић, В. Цвејић. Програмски пакет за прорачун ударних карактеристика уземљивача, 25. Саветовање ЈУКО-CIGRE, P33-02, Херцег Нови, септембар 2001.

- [171] Z. Stojković. Modelling and simulation of transmission line tower grounding impulse characteristics, *International Review on Modelling and Simulations (I.RE.MO.S.)*, Vol.4, No.1, Part A, February 2011, pp. 133-140.
- [172] Z. Stojković, M. S. Savić: Influence of transmission line tower grounding impedance to the line flashover rate, *European Trans. on Electrical Power - ETEP*, Vol. 9, No. 4, July/August 1999, pp.261-270.
- [173] S. Visacro, R. Alipio: Frequency dependence of soil parameters: experimental results, predicting formula and influence on the lightning response of grounding electrodes, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 27, 2012, pp. 927–935.
- [174] L. Grcev, F. Dawalibi. An electromagnetic model for transients in grounding systems, *IEEE Trans. on Power Delivery*, Vol. 5, No. 4, pp. 1773–1781, 1990.
- [175] D. Cavka, N. Mora, F. Raschidi. A comparison of frequency-dependent soil models: application to the analysis of grounding systems, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 56, No. 1, pp. 177–187, 2014.
- [176] M. Bañanin, M. Savić, J. Tuševljak: Modelovanje preskoaka na dugim vazдушnim razmacima, *INFOTEH-JAHORINA*, Vol. 12, Ref. ENS-1-5, стр. 107-112, 20-22. март 2013.
- [177] M. Darveniza, F. Popolansky, E. R. Whitehead: Lightning Protection of UHV Transmission Lines, *Electra*, No. 41, pp. 39 - 69, 1975.
- [178] S. Rusck: Effect of Non-Standard Surge Voltages on Insulation, *CIGRE paper 403*, Paris, 1958.
- [179] R. L. Witzke, T. J. Bliss: Co - ordination of Lightning Arrester Location with Transformer Insulation Level, *AIEE Trans.*, Vol. 69, Pt. I, pp. 964–975, 1950.
- [180] R. O. Caldwell, M. Darveniza: Experimental and Analytical Studies of the Effects of Non-Standard Waveshapes on the Impulse Strength of External Insulation, *IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS - 92, pp.1420 - 1428, 1973.
- [181] A. Pigni, G.Rizzi, E. Nati, A. Porrino, G. Baldo, G. Pesavento: Performance of large air gaps under lightning overvoltages: experimental study and analysis of accurancy of predetermination methods, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 4, No. 2, April 1989.

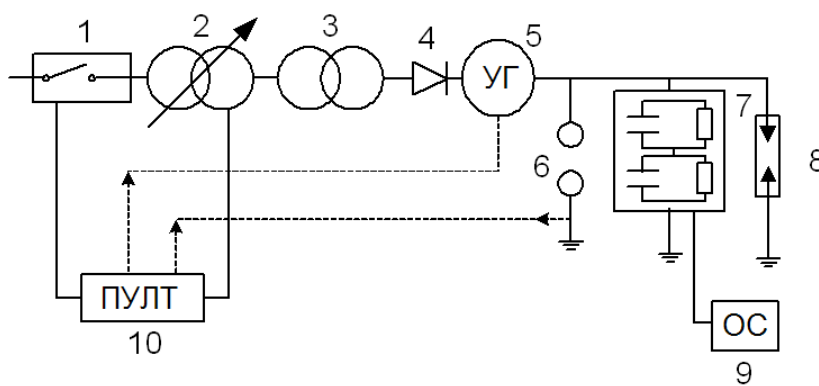
- [182] IEEE Working group 3.4.11: Modeling of metal oxide surge arresters, IEEE Transaction on Power Delivery, Vol. 7, No. 1, January 1992.
- [183] CIGRE Working Group C4.407: Lightning parameters for engineering applications, CIGRE Technical Brochure No. 549, 2013.
- [184] K. Berger, R. B. Anderson, H. Kroninger: Parameters of lightning flashes, Electra 80, pp. 23-37, 1975.
- [185] <http://www.dalekovod-proizvodnja.com/EasyEdit/UserFiles/pdf/oprema-za-gole-i-izolirane-nadzemne-elektromagnetske-mreze-hr.pdf>
- [186] <http://www.dalekovod-proizvodnja.com/EasyEdit/UserFiles/pdf/celicno-resetkasti-stupovi-za-dalekovode-10-20-i-35kv.pdf>
- [187] <http://www.dalekovod-proizvodnja.com/EasyEdit/UserFiles/pdf/ovjesna-i-spojna-oprema-hr.pdf>
- [188] http://www.ebb.rs/?page_id=54
- [189] https://library.e.abb.com/public/70e9fd6933c8c644c12578d200333cb5/952_abb_awr_mittelspannung_E_low.pdf
- [190] <https://library.e.abb.com/public/39e77eb09d90d615c1257c210033c750/ABB%20Surge%20arrester%20POLIM-S%20-%20Data%20sheet%201HC0075857%20E01%20AB.pdf>
- [191] <https://library.e.abb.com/public/96ae6992d42e3eccc1257c2100331742/ABB%20Surge%20arrester%20POLIM-I%20-%20Data%20sheet%201HC0075858%20E01%20AB.pdf>
- [192] <https://library.e.abb.com/public/99996453b441eaa7c1257d23002f1b5a/Surge%20Arrester%20Buyers%20Guide%20-%20Edition%2011%202014-05%20-%20English%20-%201HSM%209543%2012-00en.pdf>
- [193] Идентификација недозвољених напона на преносној мрежи БиХ - Елаборат, Независни оператор система БиХ, Сарајево, октобар 2010.
<http://www.nosbih.ba/files/dokumenti/Studije%20i%20elaborati/02.%20Studija/Identifikacija%20nedozvoljenih%20napona%20-%20Finalni%20izvjestaj.pdf>
- [194] Ј. Тушевљак, М. Бањанин. Примјена линијских одводника пренапона за заштиту далековаода од атмосферских пренапона, INFOTEN-JAHORINA, Vol. 13, Реф. ENS-1-2, стр. 64-69, 19-21. март 2014.

- [195] M. A. Abd-Allah, T. Elyan, E. Belal: Back flashover Analysis for Egyptian 500 kV and 220 kV Transmission towers, International Journal of Scientific and Research Publications, Vol. 6, Issue 4, April 2016.
- [196] V. Cooray. Lightning protection, IET Power and Energy Series 58, 2010.
- [197] C. A. Charalambous, N. D. Kokkinos, N. Christofides. External Lightning Protection and Grounding in Large-Scale Photovoltaic Applications, IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, Vol. 56, No. 2, April 2014.
- [198] https://en.wikipedia.org/wiki/Anaerobic_digestion
- [199] M. Rubinstein, M. A. Uman, P. J. Medelius, E. M. Thomson. Measurements of the voltage induced on an overhead power line 20 m from triggered lightning. IEEE Trans. on Electromagnetic Compatibility, Vol. 36, pp. 134–140, 1994.
- [200] M. A. Uman. The Art and Science of Lightning Protection, Cambridge University Press, 2008.
- [201] E. P. Nicolopoulou, I. F. Gonos, I. A. Stathopoulos. Experimental investigation of the external lightning protection of ships through impulse voltage tests on a scaled-down ship model, IET Science, Measurement & Technology, available online: 19 July 2016, DOI: 10.1049/iet-smt.2016.0113.
- [202] B. M. Radičević, M. S. Savić. Experimental Research on the Influence of Wind Turbine Blade Rotation on the Characteristics of Atmospheric Discharges, IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 26, Issue 4, pp. 1181-1190, Dec. 2011.
- [203] International Standard IEC 60060-1, High-voltage test techniques – Part 1: General definitions and test requirements, Second edition, 1989-11.
- [204] <http://www.haefely.com/pdf/scientific/e1-41.pdf>.
- [205] Опис и упутство за рад у Лабораторији високог напона Електротехничког факултета у Источном Сарајеву, Дипломски рад, Сања Батковић, 2009 (написан на основу пројектне документације лабораторије аутора Мирослава Љевака).
- [206] International Standard IEC 60052, Voltage measurement by means of standard air gaps, Third edition, 2002-10.
- [207] <http://planetcalc.com/2167/>
- [208] http://www.pe.ifd.uni.wroc.pl/02-instrukcja-oscyloskopu-PeakTech_1200.pdf
- [209] <http://www.tek.com/datasheet/high-voltage-probe-passive-high-voltage-probes>

9. ПРИЛОЗИ

9.1. Прилог 1 – Спецификација кориштене лабораторијске опреме

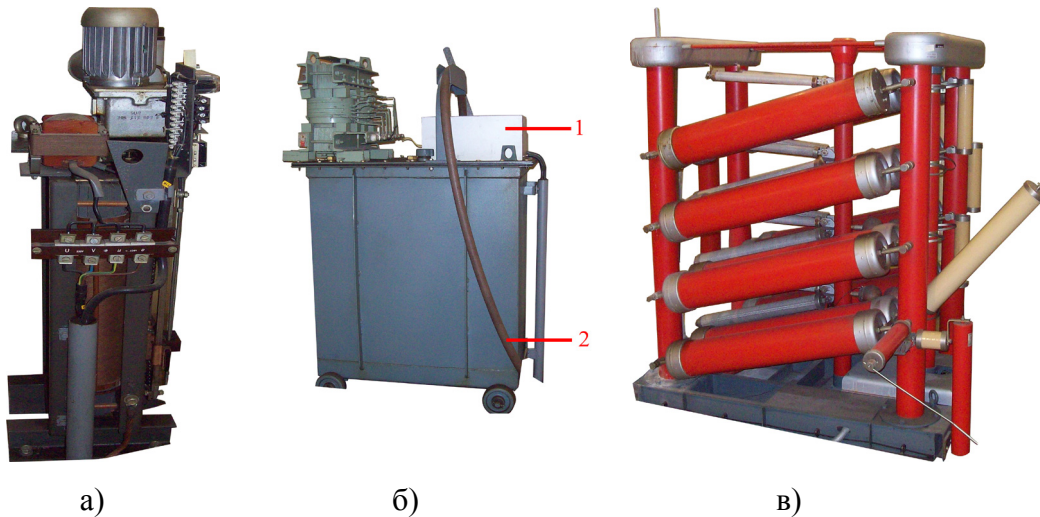
Постројење за испитивање изолације ударним напонам у оквиру Лабораторије за високи напон Електротехничког факултета у Источном Сарајеву посједује Марков ударни напонски генератор који може да производи таласе облика $1,2/50 \mu\text{s}/\mu\text{s}$ и $250/2500 \mu\text{s}/\mu\text{s}$. Ови таласи респективно представљају стандардни ударни атмосферски и стандардни ударни склопни пренапон. На слици 9.1 је приказана управљачка шема постројења [205].



Слика 9.1 – Управљачка шема постројења за испитивања ударним напонам [205]

Ознаке са слике 9.1 имају сљедеће значење:

1. Разводни ормар са главним прекидачем. Служи за укључење и искључење комплетног постројења.
2. Суви регулациони трансформатор. Приказан је на слици 9.2 а). Регулација примарног напона високонапонског трансформатора у опсегу $0\div 230 \text{ V}$.
3. Високонапонски трансформатор називног напона 125 kV и снаге 5 kVA . Приказан је на слици 9.2 б). Служи за пуњење кондензатора ударног напонског генератора.
4. Исправљач називног напона $\pm 125 \text{ kV}$. Означен је бројем 1 на слици 9.2 б). Промјена поларитета излазног напона ударног генератора се врши окретањем исправљачке јединице која се налази у заједничком казану са трансформатором. Исправљачки склоп је спојен са ударним генератором преко високонапонског кабла који је означен бројем 2 на слици 9.2 б).
5. Ударни напонски генератор називног напона 500 kV (четири степена по 125 kV) и енергије 4.4 kWs . Приказан је на слици 9.2 в).



Слика 9.2 – а) Суви регулациони трансформатор, б) високонапонски трансформатор са исправљачем и в) ударни напонски генератор [205]

6. Мјерно кугласто искриште са пречником кугли од 500 mm. Приказано је на слици 9.3 а). Предвиђено је за мјерење негативног ударног напона до 515 kV, позитивног ударног напона до 540 kV, као и једносмјерног и наизмјеничног напона индустријске учестаности. Искриште је кориштено за калибрацију дигиталног осцилоскопа и за тачно мјерење амплитуде ударног напона. Мјерење кугластим искриштем је стандардизовано и вршено је према стандарду [206]. При максималној вриједности позитивног ударног напона генератора прескок се у 50% случајева дешавао при растојању између кугли од 17 cm. Том растојању између кугли пречника 500 mm, према [206], одговара ударни прескочни напон позитивног поларитета амплитуде 422 kV у стандардним атмосферским условима: температура 20°C, ваздушни притисак 101,3 kPa, апсолутна влажност ваздуха 8,5 g/m³ [206]. Свођење стандардизоване вриједности прескочног напона на нестандардне атмосферске услове који владају у лабораторији се може урадити примјеном израза (9.1):

$$U = U_0 \cdot k \cdot \sigma \quad (9.1)$$

гдје су: U и U_0 - прескочни напони у лабораторијским и у стандардним атмосферским условима респективно [kV],

k - корекциони фактор, дефинисан је преко израза (9.2):

$$k = 1 + 0,002 \cdot (h / \sigma - 8,5) \quad (9.2)$$

h - апсолутна влажност ваздуха [g/m^3],

σ - релатива густина ваздуха, дефинисана је преко израза (9.3):

$$\sigma = \frac{b}{b_0} \cdot \frac{273+t_0}{273+t} \quad (9.3)$$

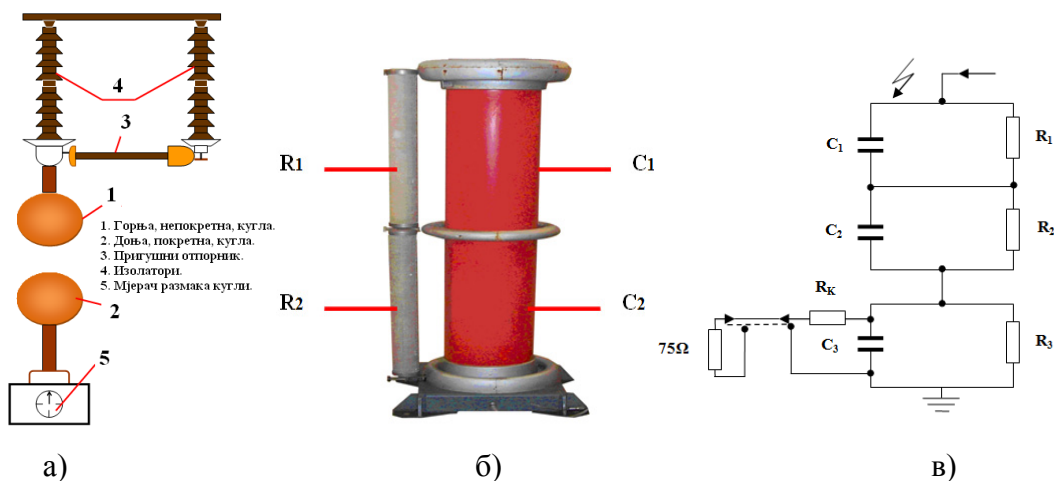
гдје су: b - атмосферски притисак [kPa],

b_0 - стандардни атмосферски притисак, $101,3 \text{ kPa}$,

t - температура ваздуха [$^{\circ}\text{C}$],

t_0 - стандардна температура ваздуха, 20°C .

У току експеримента температура ваздуха у лабораторији је била $5,3^{\circ}\text{C}$, атмосферски притисак је износио $93,4 \text{ kPa}$, а релативна влажност ваздуха је била 64% . Релативна влажност ваздуха [%] се може претворити у апсолутну влажност ваздуха [g/m^3] употребом конвертора са сајта [207]. У овом случају апсолутна влажност ваздуха износи $4,45 \text{ g}/\text{m}^3$. Уврштавајући ове вриједности у изразе (9.3) и (9.2) добијају се сљедеће вриједности константи: $\sigma=0,971$ и $k=0,992$. Константа k се често занемарује, тј. усваја се да јој је вриједност једнака јединици. Коначно, табеларна вриједност ударног прескочног напона позитивног поларитета од 422 kV у нестандардним, лабораторијским, условима износи око 406 kV , израз (9.1).



Слика 9.3 – а) Мјерно кугласто искриште, б) омско-капацитивно дјелило напона
в) еквивалентна шема дјелила напона [205]

7. Паралелно омско капацитивно дјелило напона. Приказано је на слици 9.3 б).

Еквивалентна шема дјелила напона је приказана на слици 9.3 в). Дјелило је кориштено је за скалирање ударних напона како би се њихов таласни

облик могао мјерити на дигиталном осцилоскопу. Дјелило је са мјерном опремом у командној соби спојено преко коаксијалног кабла дужине 20 m и карактеристичне импедансе 75 Ω . Преносни однос дјелила напона износи око 1:600.

8. Објекат на коме се врши испитивање ударним напоном.
9. Дигитални осцилоскоп PeakTech 1200, са карактеристикама 25 MHz и 250 MS/s [208]. У комбинацији са сондом Tektronix P5122, која има карактеристике 100X и 200 MHz [209], кориштен је за мјерење таласних облика ударних напона.
10. Командни пулт. Користи се за управљање постројењем.

9.2. Прилог 2 –Уређај за контролисано окидање ударног генератора

Постројење за испитивање изолације ударним напоном у оквиру Лабораторије за високи напон Електротехничког факултета у Источном Сарајеву дуги низ година није било у функцији. Један од разлога је што уређај за контролисано окидање ударног генератора није функционисао. Због тога је, прије него што је почео да се изводи експеримент, лабораторију требало оспособити за рад. Неисправан уређај за контролисано окидање ударног генератора је приказан на слици 9.4.

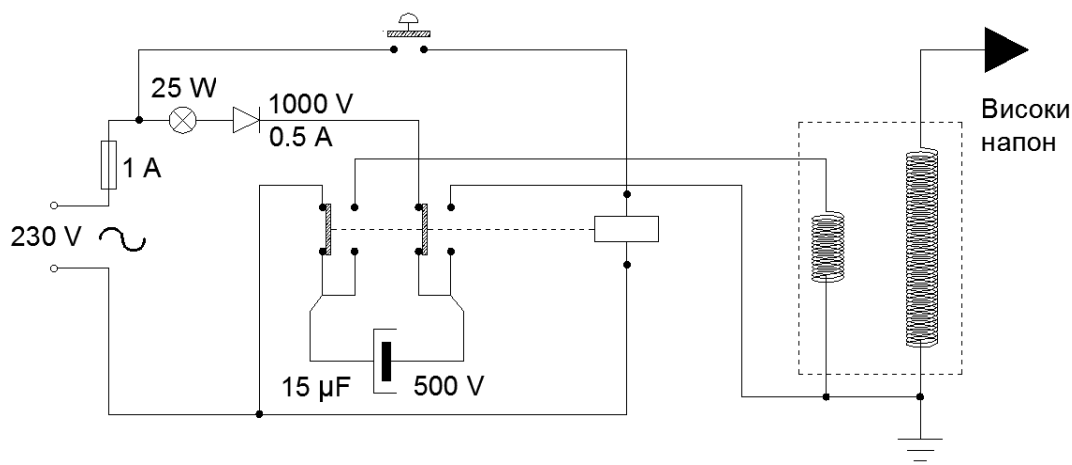


Слика 9.4 – Фотографија неисправног уређаја за контролисано окидање ударног генератора

Нови уређај за контролисано окидање ударног генератора је направљен према идеји дипл. инж. ел. Ратка Ковачића. Он је такав уређај реализовао у Лабораторији за високи напон Електротехничког факултета у Београду, али на ударном генератору са излазним напоном реда неколико десетина kV. У овом случају уређај је требао да окида генератор са излазним напоном од преко 400 kV. Због тога је након израде уређаја било неопходно провести детаљно и пажљиво испитивање његове сигурности.

Електрична шема реализованог уређаја је приказана на слици 9.5. За практичну реализацију овог уређаја били су потребни сљедећи елементи: тастер, контактер,

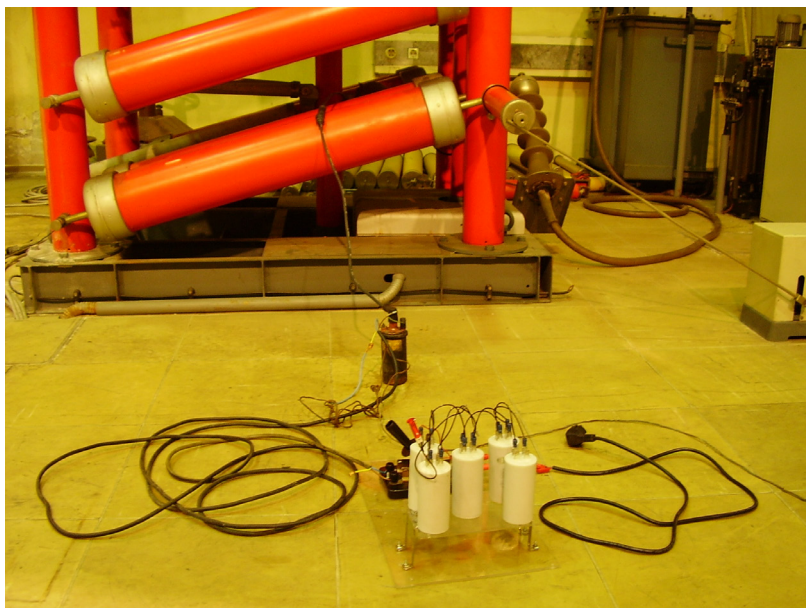
осигурач, диода, сигнална сијалица, кондензатор, индукциони калем, свјећица и одговарајући каблови и ожичење.



Слика 9.5 – Електрична шема реализованог уређаја за контролисано окидање ударног генератора

Начин функционисања уређаја се може објаснити на сљедећи начин: Кондензатор се пуни из локалне нисконапонске мреже преко мирних контаката контактера. Притиском на тастер доводи се напон на контактер који затвара радне контакте. Преко радних контаката контактера долази до пражњења кондензатора кроз индукциони калем, у овом случају бобина аутомобила. Бобина подиже примарни напон који је доведен са кондензатора на напон од неколико kV, или чак нешто изнад 10 kV. Овај напон није мјерен јер за тим није било потребе. На бобину је везана свјећица на којој се појављује искра. Та искра се води на прво кугласто искриште ударног генератора на коме се врши његово окидање. Практично реализован уређај за окидање ударног напонског генератора је приказан на слици 9.6. Уређај је смјештен у контролној соби, осим бобине која се налази поред ударног генератора.

Начин повезивања свјећице на прво кугласто искриште ударног генератора је приказан на слици 9.7. Високи напон се са свјећице преноси на сферу кугластог искришта. Са ње се појављује прескок, кроз кратки ваздушни зазор, према централној кружној електроди која је уземљена. Произведена искра доводи до окидања ударног генератора.



Слика 9.6 – Фотографија реализованог уређаја за окидање ударног генератора



Слика 9.7 – Фотографија начина повезивања свјећице на прво кугласто искриште ударног генератора на коме се врши његово окидање

Биографија аутора

Младен Бањанин је рођен 22.01.1988. године у Сарајеву, БиХ. Основну школу и гимназију је завршио у Палама, Република Српска, БиХ. За остварене резултате у школовању је награђен дипломама „Вук Стефановић Караџић“.

Електротехнички факултет Универзитета у Источном Сарајеву уписао је 2007. године. Дипломирао је на студијском програму Електроенергетика, као први у генерацији и са просјечном оцјеном 9,81. Проглашен је за најуспјешнијег дипломца у школској 2011/2012 години.

Мастер студије на Електротехничком факултету у Београду, модул Електроенергетски системи, је уписао 2011. године. Завршио их је 2012. године са просјечном оцјеном 9,83. Ментор приликом израде дипломског и мастер рада му је био проф. др Милан Савић.

Докторске студије на Електротехничком факултету у Београду, модул Електроенергетске мреже и системи, уписао је 2012. године. На пријемној листи је заузео прво мјесто у конкуренцији 78 кандидата. Положио је све испите и остварио просјечну оцјену 10.

На сва три циклуса студија је био стипендиста Фонда „др Милан Јелић“.

Од децембра 2011. године је запослен на Електротехничком факултету Универзитета у Источном Сарајеву у звању асистент, а од маја 2013. године као виши асистент. На поменутом факултету је 2016. године проглашен за најбољег научног радника из реда сарадника.

До сада је као први аутор објавио три научна рада у часописима са SCI листе. Као аутор или коаутор је објавио и два рада у часописима националног значаја, пет радова на међународним конференцијама и 14 радова на конференцијама националног значаја. Као коаутор је објавио „Практикум за лабораторијске вјежбе из Електричних мјерења“ чији је издавач Електротехнички факултет Источно Сарајево. Учествовао је у рецензирању радова за реномирани међународни часопис IEEE Transaction on Power Delivery. Радио је на изради девет комерцијалних пројеката и студија за иностране и домаће наручиоце.

Активно се служи енеглеским језиком, а посједује напредно знање њемачког језика. Ожењен је и отац једног дјетета.

Изјава о ауторству

Потписани Младен С. Бањанин

број уписа 5041/2012

Изјављујем

да је докторска дисертација под насловом

Заштита надземних вода од атмосферских пренапона у екстремним условима

- резултат сопственог истраживачког рада,
- да предложена дисертација у цјелини ни у дјеловима није била предложена за добијање било које дипломе према студијским програмима других високошколских установа,
- да су резултати коректно наведени и
- да нисам кршио ауторска права и користио интелектуалну својину других лица.

У Београду, 22.05.2017.

Потпис докторанда

Младен Бањанин

**Изјава о истовјетности штампане и електронске верзије
докторског рада**

Име и презиме аутора Младен С. Бањанин

Број уписа: 5041/2012

Студијски програм: Електротехника и рачунарство

Наслов рада: Заштита надземних водова од атмосферских пренапона у
екстремним условима

Ментор: др Златан Стојковић, редовни професор

Потписани Младен С. Бањанин

Изјављујем да је штампана верзија мог докторског рада истовјетна електронској верзији коју сам предао за објављивање на порталу **Дигиталног репозиторијума Универзитета у Београду**.

Дозвољавам да се објаве моји лични подаци везани за добијање академског звања доктора наука, као што су име и презиме, година и мјесто рођења и датум одбране рада.

Ови лични подаци могу се објавити на мрежним страницама дигиталне библиотеке, у електронском каталогу и у публикацијама Универзитета у Београду.

Потпис докторанда

У Београду, 22.05.2017.

Младен Бањанин

Изјава о коришћењу

Овлашћујем Универзитетску библиотеку „Светозар Марковић“ да у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду унесе моју докторску дисертацију под насловом:

Заштита надземних вода од атмосферских пренапона у екстремним условима

која је моје ауторско дјело.

Дисертацију са свим прилозима предао сам у електронском формату погодном за трајно архивирање.

Моју докторску дисертацију похрањену у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду могу да користе сви који поштују одредбе садржане у одабраном типу лиценце Креативне заједнице (Creative Commons) за коју сам се одлучио.

1. Ауторство
2. Ауторство – некомерцијално
3. Ауторство – некомерцијално – без прераде
4. Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима
5. Ауторство – без прераде
6. Ауторство – делити под истим условима

У Београду, 22.05.2017.

Потпис докторанда

Младен Ђоковић

1. Ауторство – Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце, чак и у комерцијалне сврхе. Ово је најслободнија од свих лиценци.
2. Ауторство – некомерцијално. Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела.
3. Ауторство – некомерцијално – без прераде. Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела. У односу на све остале лиценце, овом лиценцом се ограничава највећи обим права коришћења дела.
4. Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима. . Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела и прерада.
5. Ауторство – без прераде. Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела.
6. Ауторство - делити под истим условима. Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела и прерада. Слична је софтверском лиценцама, односно лиценцама отвореног кода.