

UNIVERZITET U BEOGRADU  
ELEKTROTEHNIČKI FAKULTET

Aleksandra Đ. Grujić

**MODELOVANJE ZONE ZAŠTITE VISOKONAPONSKOG  
POSTROJENJA OD DIREKTNOG ATMOSFERSKOG  
PRAŽNENJA**

-doktorska disertacija-

Beograd, Februar 2016

UNIVERSITY OF BELGRADE  
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING

Aleksandra Đ. Grujić

**THE MODELING OF THE PROTECTION ZONE OF  
HIGH VOLTAGE SUBSTATION FROM THE DIRECT  
LIGHTNING FLASH**

-Doctoral Dissertation-

Belgrade, February 2016

*Mentor*

Dr Zlatan Stojković, redovni profesor

(Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički fakultet )

*Članovi komisije:*

Dr Zlatan Stojković, redovni profesor

(Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički fakultet )

Dr Jovan Mikulović, vanredni profesor

(Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički fakultet)

Dr Dragutin Salamon, vanredni profesor u penziji

(Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički fakultet)

Dr Željko Đurišić, docent

(Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički fakultet)

Dr Aleksandar Ranković, vanredni profesor

(Univerzitet u Kragujevcu, Fakultet tehničkih nauka u Čačku)

Datum odbrane:

---

## ZAHVALNICA

Želela bih da zahvalim svom mentoru prof. dr Zlatanu Stojkoviću na dugogodišnjoj saradnji i strpljenju tokom izrade ove disertacije. Zahvalila bih i članovima komisije na savetima i podršci koji su doprineli konačnom izgledu disertacije.

Zahvalnost dugujem i kolegama sa Visoke škole elektrotehnike i računarstva u Beogradu, koji su svojim savetima i smernicama, koje su predstavljale inspiraciju ka stručnom i naučnom usavršavanju, doprineli finalizaciji ove disertacije.

Zahvaljujem i kolegama iz JP Elektromreža Srbije i JP Elektroprivreda Srbije koji su omogućili uvid i korišćenje informacija vezanih za prihvatni sistem gromobranske instalacije elektroenergetskih objekata Republike Srbije: HE "Đerdap 1", TE "Morava" i HE "Bistrica".

Posebnu zahvalnost dugujem svojoj porodici na bezrezervnoj i безусловnoj podršci tokom izrade ove disertacije.

# MODELOVANJE ZONE ZAŠTITE VISOKONAPONSKOG POSTROJENJA OD DIREKTNOG ATMOSFERSKOG PRAŽNJENJA

## *Rezime:*

Predmet istraživanja doktorske disertacije odnosi se na modelovanje zone zaštite visokonaponskog postrojenja (u daljem tekstu postrojenje) od direktnog atmosferskog pražnjenja. Osnovni doprinosi radu su:

1. *Formiranje generičkog modela proračuna zone zaštite primenom štapne hvataljke i zaštitnog užeta po metodi kotrljajuće sfere.* Proračun zone zaštite predstavlja važan korak u analizi ugroženosti postrojenja od direktnog atmosferskog pražnjenja. Do sada su najčešće korišćeni geometrijski i elektrogeometrijski model (EGM) koji se zasnivaju na primeni teorije udarnog rastojanja. Osnovni nedostaci pomenutih modela odnose se na neuvažavanje uticaja struje atmosferskog pražnjenja kod EGM ili na neuvažavanje uticaja i struje atmosferskog pražnjenja i lokalne geometrije štice objekta kod geometrijskog modela. Generički model je baziran na značajnom proširenju znanja o fizičkom modelu preskoka na dugim rastojanjima. Prema ovom modelu udarno rastojanje predstavlja funkciju i amplitude struje atmosferskog pražnjenja i lokalne geometrije objekta. Primena generičkog modela doprineće tačnijem određivanju zone zaštite postrojenja od direktnog atmosferskog pražnjenja. Na osnovu formiranog generičkog modela u disertaciji je analizirana i modelovana zona zaštite za konkretna postrojenja koja se nalaze u sklopu elektroenergetskog sistema (EES) Srbije. Celokupna analiza osetljivosti zone zaštite je sprovedena u zavisnosti od dispozicije postrojenja, metoda proračuna i primenjenog tipa zaštitnog uređaja. Poseban značaj je dat korišćenju zaštitnih užadi, kao čestih gromobranskih zaštitnih uređaja u postrojenja složene geometrije. Na taj način je omogućeno sagledavanje svih uticajnih faktora koje je potrebno uvažiti u modelovanju zone zaštite i projektovanju optimalnog rešenja zaštite postrojenja od direktnog atmosferskog pražnjenja.

2. *Modelovanje zone zaštite postrojenja od direktnog atmosferskog pražnjenja.* Na osnovu proračuna udarnog rastojanja na bazi generičkog modela, modelovane su zone zaštite postrojenja različitih struktura i naponskih nivoa. Postupak modelovanja zone zaštite je implementiran u originalni razvijeni softverski alat za 3D prikaz ostvarene zone zaštite “*VN Postrojenja*” u odnosu na kompleksnu geometriju svih visokonaponskih elemenata unutar postrojenja. Efikasnom tehnikom prikaza punog tela u 3D pogledu (renderovanja) omogućen je prikaz i zone zaštite i postrojenja u obliku pogodnom za vizuelnu analizu gromobranske instalacije.

3. *Formiranje metodologije i algoritma za proračun rizika kvara postrojenja i troškova gubitaka usled direktnog atmosferskog pražnjenja primenom fuzzy logike.* Korišćena metodologija se zasniva na osnovnim postavkama standarda IEC 62305. U disertaciji su modifikovani i prilagođeni izrazi za rizike kvara i troškove gubitaka usled direktnog atmosferskog pražnjenja tako da odgovaraju problematici vezanoj za postrojenja. Standard IEC 62305 još nije publikovao deo koji se tiče gromobranske zaštite postrojenja pa je u disertaciji prikazan prilagođen metod procene rizika kvara i troškova gubitaka usled direktnog atmosferskog pražnjenja u postrojenje. Metodologija procene rizika kvara i troškova gubitaka usled direktnog atmosferskog pražnjenja u postrojenje je implementirana u razvijeni originalni softverski alat “*Risk management and cost effective by IEC 62305*” čija će primena omogućiti brz i efikasan postupak procene rizika i troškova gubitaka uz uvažavanje svih bitnih karakteristika postrojenja. Primenom fuzzy logike, kao alata veštačke inteligencije, opisane su neodređenosti između ostvarene zone zaštite gromobranske instalacije i rizika kvara usled direktnog atmosferskog pražnjenja u postrojenje.

4. *Formiranje metodologije za procenu neisporučene električne energije usled direktnog atmosferskog pražnjenja u vetroturbinu ili u pripadajuće postrojenje kao i formiranje metodologije proračuna rizika kvara i troškova gubitaka.* Metodologija proračuna rizika kvara i troškova gubitaka zasniva se na metodologiji prikazanoj u standardu IEC 61400 – 24 koja se odnosi na upravljanje rizikom usled atmosferskog pražnjenja u vetroturbine. Metodologija proračuna rizika kvara i troškova gubitaka implementirana je u razvijeni originalni softverski alat “*Risk Management and cost effective for WT*” čija primena omogućava brz i efikasan postupak procene rizika i troškova gubitaka. Metodologija proračuna rizika kvara usled direktnog atmosferskog

pražnjenja u vetroturbinu prikazana je u zavisnosti od topografskih i klimatoloških karakteristika lokacija na kojoj se nalazi konkretna vetroelektrana sa pripadajućim postrojenjem. Prikazana je i metodologija proračuna neisporučene električne energije koja se zasniva na proračunu prosečne verovatnoće pojave atmosferskog pražnjenja i verovatnoće da će direktno atmosfersko pražnjenje u vetroturbinu izazvati ispad iste ili celog pripadajućeg postrojenja.

**Ključne reči:**

Visokonaponsko postrojenje, direktno atmosfersko pražnjenje, rizik kvara, fuzzy logika, vetroturbina, neisporučena električna energija

**Naučna oblast:**

Elektrotehnika

**Uža naučna oblast:**

Elektroenergetski sistemi

UDK: 621.3.

# **THE MODELING OF THE PROTECTION ZONE OF HIGH VOLTAGE SUBSTATION FROM THE DIRECT LIGHTNING FLASH**

## ***Abstract:***

The subject of the doctoral dissertation refers to the modeling of the zone of high voltage substation protection (hereinafter referred to: the substation) from the direct lightning flash. The basic contribution of this dissertation is the following:

1. *Formation of a generic model pertaining to calculating the protection zone by applying the lightning conductor and ground wire according to the rolling sphere method.* Calculating the protection zone represents an important step in the analysis of substation vulnerability due to the direct lightning flash. Geometric and Electro-geometric models (EGM) that are based on the strike distance theory have been utilized so far. The primary shortcoming of the mentioned models refer to disregarding the influence of the lightning flash in the case of EGM, or disregarding the influence and the lightning flash current and the local geometry of the protected object in the case of the geometric model. However, the generic model is based on the significant expansion of knowledge concerning the physical model of long distance surge. According to this model, the striking distance represents the function and the amplitude of the lightning flash current and the local geometry of an object. The application of the generic model will contribute to the more accurate determining the substation zone protection from the direct lightning flash. Based on the formed generic model, this dissertation has analyzes and modeled the protection zone for concrete substations located within the electro-energy system (EES) of Serbia. The overall sensitivity analysis of the protection zone has been carried out depending on the substation disposition, calculation methods and the applied type of the protection device. Special attention has been paid to the utilization of ground wires, as well as the frequent lightning arrester devices in the substations of complex geometry. Thus, it has been enabled to assess all the influencing factors that have to be taken into consideration in modeling the zone of protection and designing the optimal solution for substation protection from the direct lightning flash.



2. *The modeling of the protection zone of high voltage substation from the direct lightning flash.* Backed by the striking distance calculation on the basis of the generic model, protection zones have been modeled for substations of diverse structures and voltage levels. The protection zone modeling procedure has been implemented within the originally developed software tool for 3D display of the fulfilled protection zone "VN Substations" in relation to the complex geometry of all high voltage elements within the given substation. The efficient display technique of the full object in 3D view (of rendering) has enabled the survey of the protection zone and the substation in the form convenient for visual analysis of lightning conductor installation.

3. *The formation of methodology and algorithm for calculating the risk from substation malfunction and the loss expenses due to the direct lightning flash by applying the fuzzy logic.* The utilized methodology is based on the fundamental layout provided by the IEC 62305 standard. The expressions for malfunction risks and loss expenses due to the direct lightning flash have been modified in this dissertation in order to correspond to the problematic issues related to substations. Given the fact that the Standard IEC 62305 has not yet published the part related to the lightning protection of the substation, this dissertation puts forward the adapted method of risk assessment pertaining to malfunctioning and loss expenses due to the direct lightning flash within the substation. The risk assessment methodology pertaining to malfunctioning and loss expenses due to the direct lightning flash at the substation has been implemented within the developed original software tool "Risk management and cost effective by IEC 62305" the application of which will enable fast and efficient procedure of risk and loss expenses assessment taking into account all essential properties of the substation. The indeterminacy between the fulfilled protection zone of the lightning arrester installation and the risk of malfunctioning due to the direct lightning flash at the substation has been described by applying the fuzzy logic as an artificial intelligence tool,.

4. *Forming the methodology for assessing the undelivered electricity due to the direct lightning flash into the wind turbine or in the accompanying substation, as well as forming the methodology for calculation of the malfunctioning risk and loss expenses.* The methodology for calculating the malfunctioning risk and loss expenses is based on the methodology elaborated in the IEC 61400 – 24 standard, which pertains to risk management due to the lightning flash in the wind turbines. The methodology for

calculating malfunctioning risk and loss expenses has been implemented in the developed original software tool “*Risk Management and cost effective for WT*” the application of which enables both fast and efficient procedure for assessing the risk and loss expenses. The methodology for calculating the malfunctioning risk due to the direct lightning flash in the wind turbine has been displayed depending on the topographic and weather characteristics of the locations at which the concrete wind farm with the accompanying substation has been located. In addition to this, the dissertation also presents the methodology for calculating the undelivered electricity based on the calculation of the occurrence of lightning flash average probability and the probability of the direct lightning flash in the wind turbine that would cause the outage and malfunctioning of the wind turbine or the whole accompanying substation.

**KeyWords:** High Voltage Substation, Direct Lightning Flash, Malfunctioning Risk, Fuzzy Logic, Wind Turbine, Undelivered Electricity

**Scientific field:** Technical science – Electrical engineering

**Specific scientific field:** Power Systems

UDK: 621.3.

## Sadržaj

1. UVOD.....	1
2. TRENUTNO STANJE U OBLASTI ZAŠTITE ELEKTROENERGETSKIH OBJEKATA OD ATMOSFERSKOG PRAŽNJENJA .....	7
2.1 Trenutno stanje u oblasti zaštite elektroenergetskih objekata od atmosferskog pražnjenja u Republici Srbiji .....	7
2.1.1 Zona zaštite jedne štapne hvataljke .....	10
2.1.2 Zona zaštite dve štapne hvataljke .....	12
2.1.3 Zona zaštite tri štapne hvataljke .....	14
2.1.4 Zona zaštite četiri štapne hvataljke.....	15
2.1.5 Zona zaštite jednog užeta .....	16
2.1.6 Zona zaštite ostvarena primenom dva zaštitna užeta.....	16
2.2 Trenutno stanje u oblasti zaštite elektroenergetskih objekata od atmosferskog pražnjenja u svetu .....	17
3. MODELI ZA FORMIRANJE ZONE ZAŠTITE POSTROJENJA OD DIREKTOG ATMOSFERSKOG PRAŽNJENJA ZASNOVANI NA TEORIJI UDARNOG RASTOJANJA .....	29
3.1 Geometrijski model proračuna zone zaštite štapne hvataljke i zaštitnog užeta po metodi kotrljajuće sfere .....	30
3.2 Elektrogeometrijski model (EGM) proračuna.....	30
3.3 Generički model proračuna zone zaštite štapne hvataljke i zaštitnog užeta po metodi kotrljajuće sfere .....	31
4. METODOLOGIJA PRORAČUNA RIZIKA KVARA I TROŠKOVA GUBITAKA KOD POSTROJENJA SA PRIMENOM FUZZY LOGIKE .....	36
4.1 Komponente rizika u odnosu na izvor oštećenja .....	40
4.2 Komponente rizika u odnosu na tip oštećenja .....	41
4.3 Zbirni pregled komponenti rizika .....	42
4.4 Procena šteta nastalih usled atmosferskog pražnjenja u postrojenje .....	48

4.5	Primena fuzzy logike pri određivanju rizika kvara od atmosferskog pražnjenja kod postrojenja .....	51
5.	METODOLOGIJA PRORAČUNA RIZIKA KVARA, TROŠKOVA GUBITAKA I NEISPORUČENE ELEKTRIČNE ENERGIJE USLED DIREKTNOG ATMOSFERSKOG PRAŽNJENJA U VETROTURBINU .....	61
5.1	Metodologija proračuna rizika kvara kod vetroturbina .....	64
5.1.1	Rizici usled atmosferskih pražnjenja u vetroturbini .....	65
5.1.2	Komponente rizika usled atmosferskih pražnjenja u vetroturbini .....	65
5.1.3	Komponente rizika usled atmosferskih pražnjenja u vod koji je povezan sa vetroturbinom .....	66
5.1.4	Komponente rizika usled atmosferskih pražnjenja u blizinu voda koji je povezan sa vetroturbinom.....	66
5.1.5	Komponente rizika koje se odnose na izvor oštećenja .....	66
5.1.6	Komponente rizika u odnosu na tip oštećenja .....	67
5.2	Zbirni pregled komponenti rizika usled atmosferskog pražnjenja u vetroturbini .....	67
5.3	Procena troškova gubitaka.....	77
5.4	Procena neisporučene električne energije usled direktnog atmosferskog pražnjenja u vetroturbini .....	79
6.	FORMIRANJE ALGORITMA I SOFTVERSKIH ALATA ZA MODELOVANJE ZONE ZAŠTITE I PROCENU RIZIKA KVARA OD DIREKTNOG ATMOSFERSKOG PRAŽNJENJA U POSTROJENJE .....	81
6.1	Vizuelizacija zone zaštite postrojenja 220 kV/ 110 kV/ 10 kV.....	87
6.2	Analiza uporednog prikaza zone zaštite postrojenja primenom geometrijskog i generičkog modela.....	90
6.3	Analiza uporednog prikaza zone zaštite promenom izraza za izračunavanje udarnih rastojanja unutar generičkog modela.....	92
6.4	Analiza uporednog prikaza zone zaštite pri amplitudama struja atmosferskog pražnjenja od 200 kA prema generičkom modelu .....	94

7.	PRIMERI PRIMENE NA REALNIM POSTROJENJIMA .....	96
7.1	Primer HE "Đerdap 1" .....	96
7.2	Primer TE "Morava" sa postrojenjem 110 kV .....	122
7.3	Primer HE "Bistrica" sa postrojenjem 220 kV .....	134
7.4	Primer vetroelektrane .....	147
7.4.1	Procena rizika kvara od direktnog atmosferskog pražnjenja u vetroelektranu i pripadajuće postrojenje.....	147
7.4.2	Procena neisporučene energije usled direktnog atmosferskog pražnjenja u vetroturbinu unutar vetroelektrane ili u pripadajuće postrojenje .....	153
8.	ZAKLJUČAK.....	160
9.	LITERATURA .....	164
10.	PRILOZI.....	172
10.1	Primer postrojenja .....	172
10.2	HE "Đerdap 1" .....	174
10.3	TE "Morava" .....	182
10.4	HE "Bistrica" .....	187
10.5	Primer pripadajućeg 110 kV postrojenja pri vetroelektrani .....	193
10.6	Biografski podaci o autoru disertacije .....	195
10.7	Izjava o autorstvu.....	196
10.8	Izjava o istovetnosti štampane i elektronske verzije doktorskog rada.....	197
10.9	Izjava o korišćenju.....	198

## 1. UVOD

Pouzdanost i kvalitetno snabdevanje električnom energijom predstavlja osnovni zahtev koji pred elektroenergetski sistem (EES) postavljaju potrošači električne energije. Ovaj zahtev EES mora da ispuni po svim funkcionalnim nivoima proizvodnje, prenosa i distribucije električne energije. Na pouzdanost rada EES-a u znatnoj meri utiče pouzdanost rada visokonaponskih postrojenja (postrojenja) koja su u praksi izložena direktnim i indirektnim atmosferskim pražnjenjima. Atmosferski talasi koji su posledica atmosferskog pražnjenja mogu da ugroze postrojenje ili objekat u kojem rade ljudi koji upravljaju pogonom u elektrani ili u transformatorskoj stanici, ako se radi o postrojenjima u prenosnoj mreži, koja obično imaju posadu. Atmosfersko pražnjenje može biti u prilazne nadzemne vodove, u njihovoj blizini ili direktno u postrojenje. Sa aspekta zaštite od atmosferskog pražnjenja, najteže posledice ima direktno pražnjenje u neki od elemenata postrojenja, zbog izuzetnih opasnosti koje mogu nastati. Pre svega, osoblje može biti životno ugroženo ukoliko se nađe na otvorenom prostoru iz bilo kog razloga. Prema pravilima bezbednosti na radu, u slučaju grmljavine, radovi u postrojenju moraju se prekinuti, a opasan prostor napustiti. Ipak, nepažnjom, zaposleni se mogu naći na otvorenom prostoru ispred objekata u kojima rade. Atmosfersko pražnjenje u energetski transformator može imati katastrofalne posledice, zbog toga što može biti uništen, ali i zapaljen. Postoji mogućnost da zbog velike količine dima i požara nastane ekološki akcident, opasan po širi deo grada u kojem se eventualno nalazi postrojenje. Takođe, atmosfersko pražnjenje u neki od ostalih visokonaponskih elemenata može biti veoma opasno, zbog mogućnosti prenošenja električnog luka na ostale elemente u postrojenju. Kvar na elektronskim sistemima u elektrani ili transformatorskoj stanici mogao bi da dovede do prekida rada ovih sistema, čime bi bio ugrožen rad i svih ostalih elemenata, zbog nemogućnosti upravljanja ili zbog poremećenog rada pojedinih elektronskih uređaja. Zbog toga, zaštita od direktnog atmosferskog pražnjenja u postrojenje praktično postoji od kada i sama postrojenja. U ovoj disertaciji, osnovna tema je unapređenje postupaka za projektovanje zaštite postrojenja i elektroenergetskih objekata u njihovoj blizini od direktnog atmosferskog pražnjenja. Načini zaštite od upadnih talasa koji ulaze po nadzemnim vodovima, kao što

je izbor odvodnika prenapona ili zaštitne armature na izolatorskim lancima, predmet su drugih istraživanja.

Pri projektovanju postrojenja, kao objekata posebne namene, neophodno je formirati odgovarajuću gromobransku zaštitu koja predstavlja kompleks zaštitnih mera protiv direktnog atmosferskog pražnjenja i njegovog sekundarnog dejstva. Na taj način se obezbeđuje sigurnost pogonskog osoblja, opreme i materijala od kvarova, eksplozije, požara i rušenja. Zbog nepredvidive pojave atmosferskog pražnjenja i troškova koji su povezani sa oštećenjem visokonaponskih elemenata unutar postrojenja, javlja se potreba za stalnim istraživanjem ove pojave.

Problem zaštite postrojenja od direktnog udara groma oduvek je bio težak. Na koji način odrediti broj, raspored i položaj štapnih hvataljki (zaštitnih užadi) na portalima ili stubovima? Da li koristiti samo hvataljke, samo užad, ili njihovu kombinaciju? Kako odrediti i kako vizuelizovati zonu zaštite? Da li koristiti izuzetno efikasnu zaštitu, koja je veoma skupa, ili dozvoliti rizik da izvestan broj pražnjenja mimoide zaštitu? Po kojem kriterijumu odabrati verovatnoću prodora lidera mimo zaštite? Koliko je tačan model za određivanje zone zaštite i koji model koristiti? Nedoumica ima više.

Prvi modeli za određivanje zone zaštite bili su na osnovu eksperimenata na modelima. Rezultovali su definisanjem zaštitnog ugla štapne hvataljke ili zaštitnog užeta. Ipak, kako je vreme prolazilo, dolazilo se do saznanja da na zonu zaštite utiče više činilaca nego što se u prvi mah mislilo. Na primer, za veću visinu vrha štapne hvataljke ili zaštitnog užeta, bilo je potrebno smanjivati zaštitni ugao. Problem nejednakih visina hvataljki ili užadi činio je metod veoma teškim, a vizuelizaciju zone zaštite praktično teško izvodljivom. Takođe, veći broj autora smatra da je baza na kojoj su zasnovani rezultati eksperimentalnih istraživanja nepouzdana jer se u visokonaponskoj laboratoriji teško kvalitetno može simulirati luk velike dužine, kakav nastaje u prirodi. Osim toga, ovi modeli nisu bili zasnovani na riziku, koji predstavlja vrednost verovatnih srednjih godišnjih gubitaka usled atmosferskog pražnjenja, vezano za ljudske živote i ekonomsku štetu, u odnosu na ukupnu vrednost, opet vezano za ljude i materijalna dobra u šticeenom objektu [1]. Drugim rečima, do sada nije praktikovano da se zaštita postrojenja od atmosferskih pražnjenja projektuje tako da se stepen zaštite poveže sa unapred usvojenim rizikom. U ovoj disertaciji, jedan od osnovnih zadataka je

da se taj nedostatak modela za određivanje zaštitne zone otkloni definisanjem potpuno novog pristupa u projektovanju zaštite, a koji će omogućiti da se usvojen rizik ostvari sa najmanjim finansijskim ulaganjima za gromobransku zaštitu. Usvajanjem dozvoljenog rizika, traži se takva gromobranska zaštita koja će biti najjeftinija. Poznato je da je ovaj princip primenjen za zaštitu uobičajenih objekata od atmosferskog pražnjenja, ali nije primenjivan za postrojenja. Standard IEEE 998 [2], koji se koristi u USA, uvideo je nepostojanje rizika kao kriterijuma, zbog čega inicira istraživanje u tom pravcu. Doprinosi ove disertacije rezultat su upravo takvog istraživanja.

Cilj svake gromobranske instalacije je smanjenje rizika od atmosferskog pražnjenja na tolerantan nivo i ostvarivanje što veće efikasnosti realizovane zone zaštite. Procena tolerantnog nivoa se zasniva na određivanju dozvoljenog rizika prilikom procene ugroženosti ljudskih života. Ukoliko je procenjeni rizik ispod dozvoljenog nivoa, tada dalja procena potrebe za gromobranskom instalacijom obuhvata ekonomsku analizu, koja podrazumeva procenu troškova sistema zaštite u odnosu na troškove koji nastaju usled štete prilikom atmosferskog pražnjenja.

Rizik od atmosferskog pražnjenja u bilo koji objekat je funkcija visine objekta, lokalne topologije zemljišta i lokalnog nivoa grmljavinske aktivnosti. Informacije u vezi lokalnih vremenskih uslova prikupljaju se kada je god to moguće. Polazna osnova za usvajanje vrednosti pojedinih rizika od atmosferskih pražnjenja je standard IEC 62305-2 [1].

Prilikom određivanja rizika od atmosferskih pražnjenja treba imati u vidu da je pojava atmosferskog pražnjenja stohastičke prirode, pa nije moguće napraviti potpuno precizna kratkoročna predviđanja broja atmosferskih pražnjenja za pojedinačne objekte. Međutim, procena rizika omogućava određivanje smanjenja rizika od atmosferskih pražnjenja projektovanjem gromobranske instalacije i na taj način omogućava poređenje postojećih rizika za različita postrojenja.

U cilju zaštite postrojenja od atmosferskih pražnjenja, projektuje se i izvodi odgovarajuća spoljašnja i unutrašnja gromobranska instalacija. Sastavni deo spoljašnje gromobranske instalacije je prihvatni sistem, koji se definiše kao sistem provodnika čija je uloga da na sebe prihvati direktna atmosferska pražnjenja, i na taj način spreči oštećenje objekata.



Pri projektovanju prihvatnog sistema neophodno je izvršiti proračun zone zaštite, koja predstavlja prostor u kojem se sa malom verovatnoćom može dogoditi direktno atmosfersko pražnjenje. Proračun zone zaštite predstavlja važan korak u analizi ugroženosti postrojenja od direktnih atmosferskih pražnjenja. Ovaj proračun se zasniva na korišćenju različitih empirijskih ili fizičkih modela. Geometrijski model i EGM zasnivaju se na primeni teorije udarnog rastojanja. Prvi model pretpostavlja da je udarno rastojanje nezavisno od amplitude struje atmosferskog pražnjenja i lokalne geometrije razmatranog objekta. Prema EGM-u, udarno rastojanje prikazano je kao funkcija samo amplitude struje atmosferskog pražnjenja, a ne i lokalne geometrije objekta. Ipak, do sada, ni autori koji su predlagali EGM nisu koristili pristup da se potrebna zona zaštite kvantifikuje prihvatljivim rizikom.

Osnovni nedostatak pomenutih modela odnosi se na neuvažavanje jednog uticaja (lokalne geometrije štice objekta, EGM) ili oba uticaja (struje atmosferskog pražnjenja i geometrije objekta, geometrijski model). U literaturi publikovanoj poslednjih godina prikazan je novi, generički model, koji je baziran na značajnom proširenju znanja o fizičkom modelu preskoka na dugim rastojanjima [2 - 4]. Prema ovom modelu udarno rastojanje predstavlja funkciju i amplitude struje atmosferskog pražnjenja i lokalne geometrije objekta. Na osnovu pregleda literature zaključeno je da primena generičkog modela nije dovoljno zastupljena u određivanju zone zaštite postrojenja od direktnog atmosferskog pražnjenja. Prema Hajlemanu [3], osnovni nedostaci EGM u praksi su relativno teška vizuelizacija ostvarene zone zaštite, naročito u slučaju asimetričnog rasporeda hvataljki ili užadi, kao i njihove nejednake visine. Takođe, izračunavanje udarnog rastojanja povezano je sa izvesnim teškoćama jer ono zavisi od vrednosti struje atmosferskog pražnjenja. Kod definisanja optimalne konfiguracije zaštitnih sredstava, veoma je važno da postupak bude brz i efikasan. Drugi veoma važan cilj u ovoj disertaciji je da se formira automatizovan postupak, zasnovan na kriterijumima ekspertskih sistema, kojim se zona zaštite vizualizuje kao trodimenziona, sa automatskim preračunavanjima dimenzija u slučaju da se traži optimalna varijanta zaštite za zadati nivo prihvatljivog i usvojenog rizika. To je ostvareno primenom automatizovanih postupaka u softverskim alatima AutoCAD i Visual Basic. Na taj način, za izračunati i usvojeni dozvoljeni rizik, softverskim alatom

izračunava se i definiše zona zaštite, uz izvanrednu vizualizaciju i kratko vreme za analizu većeg broja varijantnih rešenja.

Cilj istraživanja je modelovanje zone zaštite postrojenja od direktnog atmosferskog pražnjenja. Celokupna analiza osetljivosti zone zaštite je sprovedena u zavisnosti od dispozicije postrojenja, metoda proračuna i primenjenog tipa zaštitnog uređaja. Poseban osvrt biće zasnovan na primeni generičkog metoda i korišćenju zaštitnih užadi i štapnih hvataljki, kao često korišćenih zaštitnih uređaja u postrojenjima složene geometrije. Na taj način, biće omogućeno sagledavanje svih uticajnih faktora koje je potrebno uvažiti u modelovanju zone zaštite i projektovanju optimalnog rešenja zaštite postrojenja od atmosferskih pražnjenja.

Upravljanje rizikom je jedna od aktuelnih tema u oblasti elektroenergetike. Sve veća potreba za upravljanjem rizikom se posebno ogleda u fazama projektovanja, eksploatacije i revitalizacije postrojenja. Zbog potrebe za upravljanjem rizikom kvara i troškova usled direktnog i indirektnog atmosferskog pražnjenja u postrojenje od velikog značaja je modifikacija metodologije koja je prikazana u standardu IEC 62305-2 [1]. Standard IEC 62305-2 [1] se odnosi na proračun rizika kvara i troškova usled direktnog i indirektnog atmosferskog pražnjenja u objekte, telekomunikacione vodove i dalekovode, a u disertaciji je razvijena prilagođena metodologija proračuna rizika kvara i troškova usled direktnog i indirektnog atmosferskog pražnjenja u postrojenje. Zbog postojanja velikog broja različitih rizika od direktnog i indirektnog atmosferskog pražnjenja u standardu IEC 62305-2 [1], u disertaciji je prikazan razvijen originalan softverski alat "*Risk management and cost effective by IEC 62305*", koji je zasnovan na savremenim CAD/CAE tehnikama i kao modularan, podložan je modifikacijama i proširenju na osnovu iskustava i zahteva iz prakse.

U disertaciji su predložena napredna tehnička rešenja za smanjenje rizika kvara usled atmosferskog pražnjenja u postrojenje. Disertacija prikazuje originalan razvijen metod povezivanja rizika od direktnog atmosferskog pražnjenja u postrojenje sa ostvarenom zonom zaštite konkretnog prihvatnog sistema gromobranske instalacije koristeći fuzzy logiku, jer ne postoje matematički modeli koji bi povezali ostvarenu zonu zaštite sa rizicima od atmosferskog pražnjenja u postrojenje. Dobijeni rezultati na osnovu teoretske postavke rizika i ostvarene zone zaštite gromobranske instalacije prikazani su na konkretnim hidroenergetskim objektima "Đerdap 1" i "Bistrica" i

termoenergetskom objektu "Morava". Postrojenja ovih energetskih objekata su prikazana sa aktuelnim dimenzijama pripadajućih visokonaponskih elemenata. Kroz prikazanu analizu osetljivosti, zona zaštite gromobranske instalacije povezana je sa rizicima od atmosferskog pražnjenja u postrojenja. Brz i efikasan proračun pomenutih rizika i određivanje zone zaštite ostvarene instalacijom prihvatnog sistema gromobranske instalacije postignuti su primenom fuzzy logike i korišćenjem razvijenog originalnog softverskog alata "*Risk management and cost effective by IEC 62305*".

## **2. TRENUTNO STANJE U OBLASTI ZAŠTITE ELEKTROENERGETSKIH OBJEKATA OD ATMOSFERSKOG PRAŽNENJA**

### **2.1 Trenutno stanje u oblasti zaštite elektroenergetskih objekata od atmosferskog pražnjenja u Republici Srbiji**

Gromobranska zaštita objekata predstavlja kompleks zaštitnih mera protiv direktnog atmosferskog pražnjenja i njegovog sekundarnog dejstva, čime se obezbeđuje sigurnost ljudi, opreme i materijala od eksplozije, požara i rušenja.

Rezultat direktnog atmosferskog pražnjenja je rušenje objekata i postrojenja, paljenje zapaljivih i eksplozivnih materijala i povreda ljudi. Dejstvu direktnog atmosferskog pražnjenja najviše su izložene usamljeni i visoki objekti, u koje spadaju i postrojenja.

Pored direktnog atmosferskog pražnjenja, može se pojaviti i sekundarno dejstvo direktnog atmosferskog pražnjenja. Prilikom direktnog atmosferskog pražnjenja, kao rezultat elektromagnetne indukcije, dolazi do sekundarnog dejstva, koje se ogleda u povećanju napona, a samim tim i razlike potencijala na čeličnim konstrukcijama, uređajima sa metalnim kućištem, cevovodima, dizalicama i na svemu onom što se nalazi u postrojenju i nije izloženo direktnom atmosferskom pražnjenju.

U cilju smanjenja posledica atmosferskog pražnjenja, projektuje se i izvodi odgovarajuća gromobranska instalacija. Gromobranska instalacija se sastoji od spoljašnje i unutrašnje gromobranske instalacije. Spoljašnju gromobransku instalaciju čine prihvatni sistem, spustni provodnici i sistem uzemljenja. Unutrašnju gromobransku instalaciju čine svi elementi koji imaju za cilj da smanje negativan elektromagnetni uticaj na visokonaponske elemente, ali i niskonaponske, elektronske i upravljačke uređaje unutar postrojenja i komandne zgrade.

Prihvatni sistem gromobranske instalacije predstavlja sistem koji ima ulogu da efikasno prihvati direktno atmosfersko pražnjenje. Njega čine: štapne hvataljke, zaštitna užad i mreža provodnika. U disertaciji je posebna pažnja posvećena štapnoj hvataljci i zaštitnom užetu. Zbog geometrije postrojenja, mreža provodnika, koja se može primeniti kod uobičajenih objekata, u postrojenjima se ne može koristiti.

Gromobranska instalacija nikada ne može biti realizovana sa učinkom od 100%. Osnovni razlog je da drugo i ostala pražnjenja u jednom atmosferskom pražnjenju mogu biti sa strujom većom od kritične struje, koja predstavlja najmanju struju pri kojoj dolazi do preskoka na elementima postrojenja, ukoliko pražnjenje pogodi neki od elemenata postrojenja. Mogućnost da struja drugog ili ostalih pražnjenja bude veća od kritične struje prvog pražnjenja teško je predvidiva, zbog čega se u literaturi ona uvek smatra malom i zanemaruje se u izračunavanjima. Međutim, pojava drugog udara sa većom strujom kroz još uvek zagrejani kanal može da se desi, zbog čega se uvek naglašava da zaštita nikada ne može da se smatra stoprocentnom. Zaštita od kritičnih struja u postrojenju veoma je skupa, zbog čega se praktično nikada ne koristi. To znači da se zaštita postrojenja od atmosferskog pražnjenja, kao uostalom i za ostale tipove objekata, izvodi za struje veće od kritične, zbog čega se dozvoljava mogućnost da struje manjih intenziteta zaobiđu gromobransku instalaciju i pogode objekat. U tom slučaju, objekat može biti ugrožen u izvesnoj meri, sa mogućnošću da nastanu gubici, u smislu ugroženosti ljudi koji su u objektima u blizini postrojenja, ili ekonomski gubici, vezani za popravku ili zamenu oštećene opreme i neisporučenu električnu energiju. Osim toga, od izuzetnog je značaja što elektroprivredni objekti spadaju u objekte koji su od velikog društvenog značaja, čiji prekid rada može da ugrozi normalan život stanovništva, ili da čak ugrozi živote ljudi, na primer, u bolnicama, kao i da izazove veliku ekološku štetu zbog paljenja ulja energetske transformatora. Zbog toga, može doći do atmosferskog pražnjenja mimo gromobranske instalacije postrojenja. U tom slučaju atmosfersko pražnjenje može izazvati sledeće posledice [5]:

- Požar na visokonaponskim elementima,
- Mehanička oštećenja visokonaponskih elemenata,
- Topljenje metalnih delova,
- Povišeni potencijal uzemljivača u odnosu na ostale elemente postrojenja.

Gromobranska instalacija mora da zaštiti objekte, zaposlene, materijal i predmete koji se nalaze u njima od štetnih posledica atmosferskog elektriciteta. Gromobranska zaštita izvodi se iz dva razloga: jedan je socijalni, a drugi je ekonomski.

Pod socijalnom zaštitom podrazumeva se zaštita ljudi i ona je uslovljena zakonskim propisima i normativima.

Pod ekonomskom zaštitom podrazumeva se zaštita individualne i društvene svojine od štetnog dejstva atmosferskog pražnjenja. To su uglavnom građevinski objekti i materijal koji se nalazi i čuva u njima. Znatne gubitke u privredi prouzrokuju atmosferska pražnjenja na raznim objektima koji uopšte nemaju, ili imaju neodgovarajuću gromobranksku zaštitu.

Štete nastale zbog narušavanja procesa proizvodnje mogu da budu znatno veće u odnosu na štete nastale fizičkim oštećenjem ili uništenjem samih proizvodnih objekata.

Ovakve štete ne mogu se izbeći, ali se izgradnjom propisanih gromobrankskih instalacija mogu svesti na najmanju moguću meru. Takve instalacije imaju dug vek trajanja (i preko 30 godina), te se uložena sredstva, za ovo vreme potpuno amortizuju.

Gromobrankska instalacija na objektu mora tokom vremena da pokaže sledeće osobine:

- sigurnost u provođenju struje atmosferskog pražnjenja u zemlju,
- mehaničku čvrstoću (da izdrži udar struje atmosferskog pražnjenja, a da se ne deformiše i istopi),
  - korozivnu postojanost u toku vrlo dugog vremena,
  - termičku izdržljivost,
  - arhitektonsku usklađenost,
  - ekonomičnost.

Gromobrankska instalacija elektroenergetskih objekata u Republici Srbiji izvodi se prema *Pravilniku o tehničkim normativima za zaštitu objekata od atmosferskog pražnjenja* ("Sl. list SRJ", br. 11/96) i tehničkoj preporuci. U Republici Srbiji važeća tehnička preporuka je TP-25 "Koordinacija izolacije u mrežama visokog napona" od 1983. godine [6].

Nastoji se da svi gromobrankski vodovi i vodovi za unutrašnje uzemljenje budu izvedeni od što dužih komada sa što manje spojeva. Prihvatni sistem gromobrankske instalacije mora da izdrži naprezanja koja potiču od struje atmosferskog pražnjenja kao i dodatne mehaničke sile usled vetra, snega, leda, promene temperature i dejstva korozije. Najveći dozvoljeni porast temperature provodnika kroz koji protiče struja atmosferskog pražnjenja ne sme biti veći od 150 °C, iznad temperature okoline.

Elektroenergetski objekti u Republici Srbiji štite se od atmosferskog pražnjenja gromobrankskim elementima kao što su zaštitno uže i štapna hvataljka. Mogu se koristiti

i kombinacije štapnih hvataljki i zaštitnih užadi. Same komandne zgrade i mašinske hale koje su pri elektroenergetskim objektima mogu se štititi, osim štapnim hvataljkama i/ili zaštitnom užadi, i mrežom provodnika – pocinkovanim trakama iznad i na delovima objekta upravne zgrade. Osnovni izrazi koji opisuju konstrukciju zone zaštite prema TP – 25 ZEP-a predstavljeni su u nastavku [6]. Na žalost, tehnička preporuka TP – 25 datira još iz 1983. godine, tako da je stanje u oblasti zaštite elektroenergetskih objekata od atmosferskog pražnjenja u Republici Srbiji u priličnoj stagnaciji.

Standardan metod pri određivanju zone zaštite je da se za referentnu visinu štice postrojenja uzima visina najvišeg visokonaponskog elementa. Na osnovu zahtevane zone zaštite odabiraju se tipovi i dimenzije potrebnih gromobranskih elemenata (štapne hvataljke i/ili zaštitna užad) tako da najviši visokonaponski element unutar postrojenja bude u zoni zaštite projektovane gromobranske instalacije.

Starija tehnička rešenja gromobranske instalacije u postrojenjima su podrazumevala postavljanje većeg broja štapnih hvataljki na portalne čelično rešetkaste nosače na dalekovodnim poljima ali i na sabirničkom sistemu. Tada su se uglavnom projektovale užaste sabirnice koje su imale prilično veliku i visoku čelično rešetkastu konstrukciju na čije vrhove su se postavljale štapne hvataljke. Novijim tehničkim rešenjima sabirnice se projektuju kao cevne koje se oslanjaju na "T" nosače. Na ovaj način nastaje problem projektovanja prihvatnog sistema gromobranske instalacije za centralni deo postrojenja, jer ovakvi nosači nisu pogodni za postavljanje štapnih hvataljki.

Tada je kao ekonomično i dobro rešenje za projektovanje prihvatnog sistema gromobranske instalacije postrojenja usvojeno postavljanje jednog centralnog rasvetnog stuba na čiji se vrh postavlja štapna hvataljka, koja štiti najveći deo postrojenja, i/ili korišćenje većeg broja zaštitnih užadi.

### **2.1.1 Zona zaštite jedne štapne hvataljke**

U uvodu je ukazano na činjenicu da su prvi metodi za projektovanje zaštite od direktnog udara groma u postrojenje bili empirijski metodi. Oni se odnose na atmosfersko pražnjenje u samo postrojenje, a ne u okolne objekte – upravnu zgradu i prilazne vodove. U empirijske metode spadaju metod fiksnog ugla, kao i metod po kome su iz eksperimentalnih istraživanja izvedene krive kojima se određuje zona

zaštite. Krive kao parametre obično sadrže broj hvataljki ili užadi, vjerovatnoću prodora atmosferskog pražnjenja mimo gromobranske instalacije, visinu hvataljke iznad zemlje, horizontalno rastojanje štice objekta od stuba sa štapnom hvataljkom, kao i visine štice objekata iznad zemlje [7]. Krive Vagnera (Wagner) i njegovih saradnika definisane su za vjerovatnoće prodora struje pražnjenja mimo gromobranske instalacije od 0.1%, 1%, 5%, 10% i 15%. Međutim, u Jugoslaviji, kasnije u Republici Srbiji, čak i danas, koriste se empirijske krive ruskih autora. U vreme kada su u USA i zemljama pod njihovim uticajem izvođena istraživanja metoda zaštite postrojenja od atmosferskog pražnjenja, veoma slična istraživanja izvođena su i u tadašnjem SSSR-u. U Institutu za energetiku SSSR-a izvođena su eksperimentalna istraživanja na modelima, u kojima su varirani različiti parametri (položaj lidera i struje atmosferskog pražnjenja, visina štapnih hvataljki ili zaštitnih užadi i slično), na osnovu čega su određene krive za zaštitu od direktnog atmosferskog pražnjenja u postrojenje, a koje su prikazane u ruskim tehničkim preporukama. Međutim, krive iz tih preporuka, prikazane u [8], pretočene su u izraze na osnovu kojih se može odrediti potrebna visina hvataljki ili zaštitnih užadi za zaštitu objekata određene visine. Te krive i izrazi korišćeni su i u Jugoslaviji, kasnije Republici Srbiji, a koriste se i danas. Prema [8], krive su definisane za vjerovatnoću prodora atmosferskog pražnjenja mimo zaštite od 0,1%. Važno je napomenuti da krive definisane na taj način nisu definisane elektrometrijskim metodom, iako su prikazane kao krive linije. Dobijene su na osnovu eksperimentalnih ispitivanja na modelima, a izrazi za određivanje položaja hvataljki dati su pomoću pogodnih matematičkih izraza.

Hajleman u [3] ukazuje na osnovni problem u korišćenju izraza dobijenih na modelima. To je problem nedovoljne mogućnosti da ispitivanja na modelima u visokonaponskoj laboratoriji tačno opišu pojavu atmosferskog pražnjenja u prirodi, jer su u prirodi rastojanja između oblaka i objekata na zemlji, kao i dimenzije oblaka, mnogo veće nego u laboratoriji. Drugi problem je veoma teška vizuelizacija zone zaštite, a problem više hvataljki i/ili stubova različite visine praktično je nemoguće uzeti u obzir jer su analizirane samo simetrične konfiguracije više hvataljki. Zbog toga, modeli zaštite postrojenja od direktnog atmosferskog pražnjenja zasnovani na fiksnom zaštitnom uglu ili na eksperimentalnim krivama smatraju se zastarelim. Ipak, ti metodi uspešno su korišćeni, a koriste se i danas. U nastavku je prikazan metod za određivanje



zone zaštite od direktnog atmosferskog pražnjenja u postrojenje na otvorenom prostoru, u Republici Srbiji, prema važećoj TP-25 [6].

Zona zaštite jedne štapne hvataljke prikazana je na slici 2.1, a poluprečnik zone zaštite  $r_x$  se izračunava na osnovu izraza:

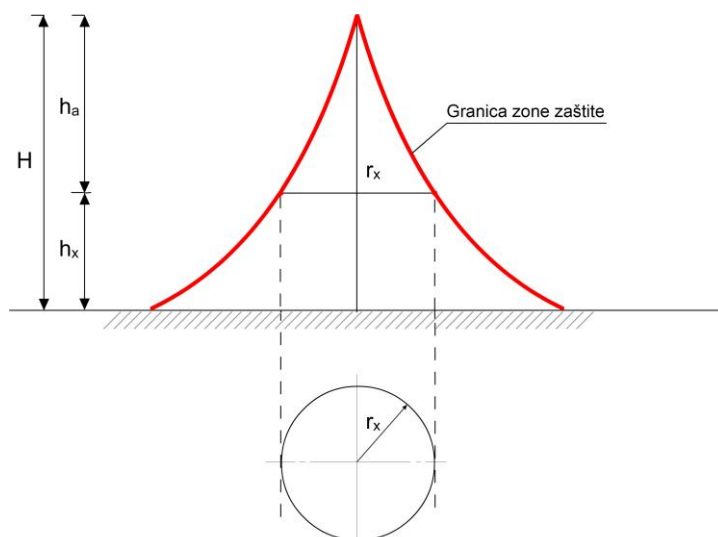
$$r_x = \frac{1,6 \cdot h_a}{1 + \frac{h_x}{H}} \cdot p \quad (2.1)$$

gde je:

$r_x$  – poluprečnik zone zaštite na visini  $h_x$  u [m]

$h_a$  – visina hvataljke u odnosu na objekat koji se štiti u [m]

$h_x$  – visina objekta koji se štiti iznad zemlje u [m]



Slika 2.1: Zona zaštite jedne štapne hvataljke

$H$  – visina hvataljke u odnosu na zemlju u [m]

$p$  – koeficijent za različite visine gromobrana

$p = 1$ , za  $H \leq 30$  m,  $p = 5,5/\sqrt{H}$  za  $30$  m  $< H < 60$  m

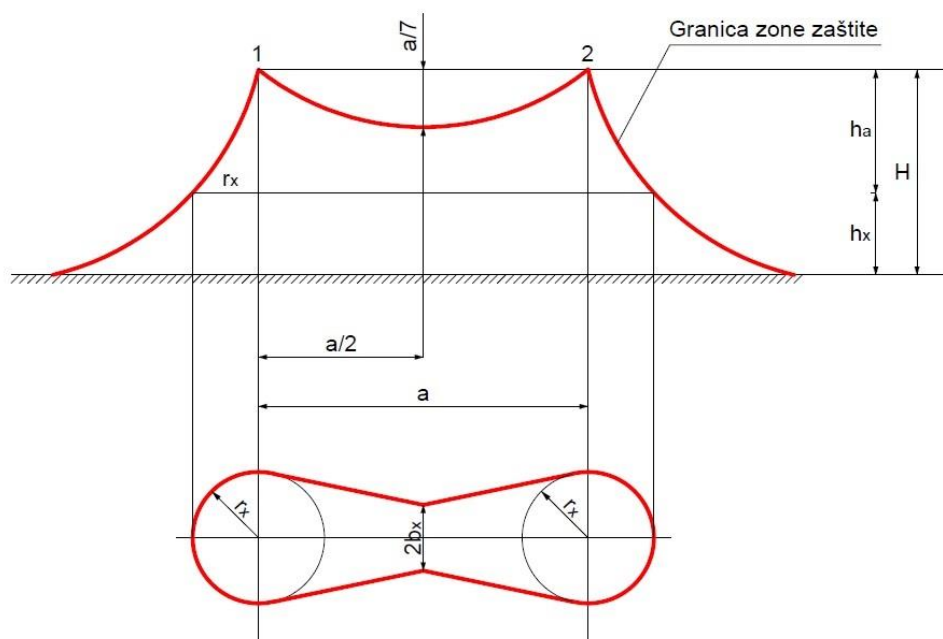
### 2.1.2 Zona zaštite dve štapne hvataljke

Prilikom konstruisanja zone zaštite dve štapne hvataljke prvo se određuje zona zaštite za svaki štap posebno, kao što je prikazano na slici 2.2. Zatim se postavlja horizontalna duž od štapne hvataljke 1 do štapne hvataljke 2. Zona zaštite između

štapova se određuje postavljanjem kružnog luka kroz vrh štapne hvataljke 1 (tačka 1), kroz vrh štapne hvataljke 2 (tačka 2) i kroz tačku na sredini rastojanja 1-2 koja je spuštена za 1/7 rastojanja između tačaka 1 i 2. Prostor ispod kružnog luka između tačaka 1 i 2 nalazi se u zoni zaštite obe štapne hvataljke. Najuži deo zone zaštite se izračunava pomoću izraza:

$$2 \cdot b_x = 2 \cdot r_x \cdot \frac{7 \cdot h_a - a}{12,5 \cdot h_a - a} \cdot \frac{12,5}{7}, \text{ za } H \leq 30 \text{ m} \quad (2.2)$$

gde je  $a$  – udaljenost između hvataljki istih visina data u [m], ostale veličine su opisane u 2.1.1.

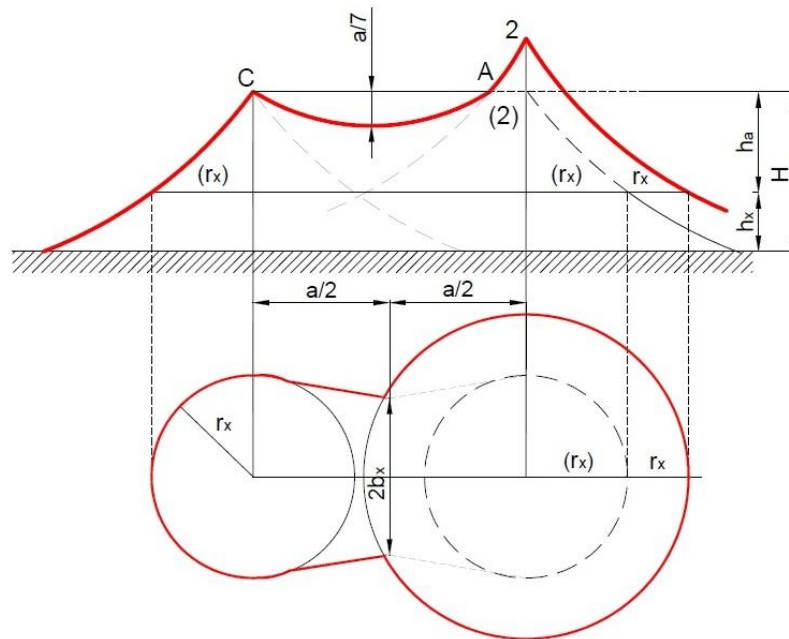


Slika 2.2: Zona zaštite dve štapne hvataljke iste visine

Kada dve štapne hvataljke nisu iste visine onda se na granici zone zaštite više štapne hvataljke određuje fiktivna štapna hvataljka iste visine kao što je visina niže štapne hvataljke i određuje se širina zone  $b_x$  kao za štapnu hvataljku iste visine, na način prikazan na slici 2.3.

Zona zaštite se prvo određuje za svaku štapnu hvataljku posebno. Zatim se postavlja horizontalna prava na visini niže štapne hvataljke do preseka sa zonom zaštite više štapne hvataljke (tačka A). Zona zaštite između štapnih hvataljki se određuje postavljanjem kružnog luka kroz vrh niže štapne hvataljke (tačka C), kroz presečnu tačku horizontalne prave na visini niže štapne hvataljke sa granicom zone zaštite više štapne hvataljke (tačka A) i kroz tačku na sredini rastojanja A-C koja je spuštена za 1/7

rastojanja između tačaka A i C. Prostor ispod kružnog luka između tačaka A i C nalazi se u zoni zaštite obe štapne hvataljke. Prostor desno od tačke A ograničen zonom zaštite više štapne hvataljke, predstavlja zonu zaštite za obe štapne hvataljke. Zone zaštite sa spoljašnjih strana štapnih hvataljki (levo od niže i desno od više štapne hvataljke) određuju se kao za pojedinačne štapne hvataljke.



Slika 2.3: Zona zaštite dve štapne hvataljke različitih visina

### 2.1.3 Zona zaštite tri štapne hvataljke

Objekti koji se štite od atmosferskog pražnjenja sa tri štapne hvataljke biće u zoni zaštite ukoliko prečnik kruga  $D$ , dobijen konstrukcijom kao na slici 2.4, zadovoljava uslov:

$$D \leq 8 \cdot h_a \text{ za } H \leq 30 \text{ m}$$

$$D \leq 8 \cdot h_a \cdot p \text{ za } H > 30 \text{ m} \quad (2.3)$$

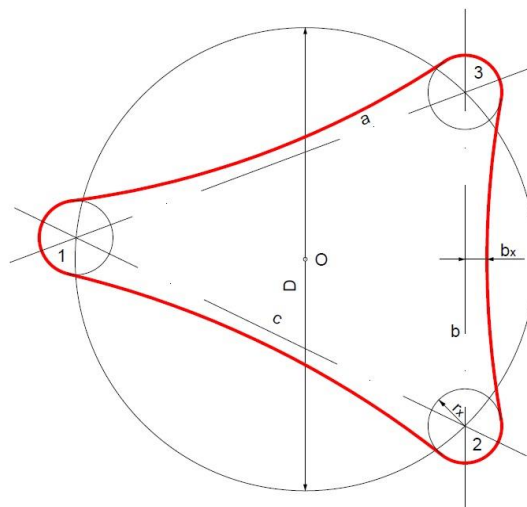
Prečnik kruga  $D$  izračunava se na osnovu sledećeg izraza:

$$\frac{D}{2} = \frac{a \cdot b \cdot c}{4 \cdot \sqrt{s \cdot (s-a) \cdot (s-b) \cdot (s-c)}} \quad (2.4)$$

gde se poluobim  $s$  izračunava prema sledećem izrazu:

$$s = \frac{a+b+c}{2} \quad (2.5)$$

Vrednosti za  $r_x$  i  $b_x$  se izračunavaju prema izrazima (2.1) i (2.2).

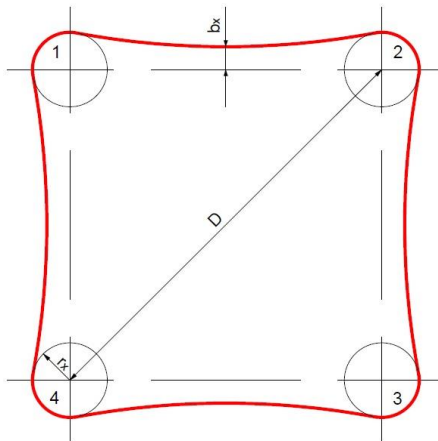


Slika 2.4: Zona zaštite tri štapne hvataljke

#### 2.1.4 Zona zaštite četiri štapne hvataljke

Na slici 2.5 je prikazana zona zaštite ostvarena pomoću četiri štapne hvataljke. U zoni zaštite naći će se površina između štapnih hvataljki ako veća dijagonala četvorougla koji oni obrazuju ispunjava uslov prema izrazu (2.3), ili se četvorougao razloži na dva trougla pa se problem rešava kao što je prikazano u 2.1.3 za zonu zaštite sa tri štapne hvataljke. Zona zaštite više štapnih hvataljki određuje se povezivanjem tačaka u kojima su postavljene štapne hvataljke. Oko svake tačke u kojoj je postavljena štapna hvataljka konstruiše se krug poluprečnika  $r_x$ , koji se određuje iz izraza (2.1). Najmanja udaljenost granice zaštitne zone od prave koja povezuje tačka u kojima su postavljene gromobrani određuje se iz izraza (2.2), umanjena dva puta.

Izračunata najmanja širina zaštitne zone  $b_x$  nalazi se na polovini rastojanja između dve štapne hvataljke. Postavljanjem prave koja tangira kružnu zonu zaštite pojedinačnih štapnih hvataljki i koja prolazi kroz tačku na polovini rastojanja između štapnih hvataljki, a koja je na rastojanju  $b_x$  od duži koja spaja štapne hvataljke, dobija se granica zone zaštite.

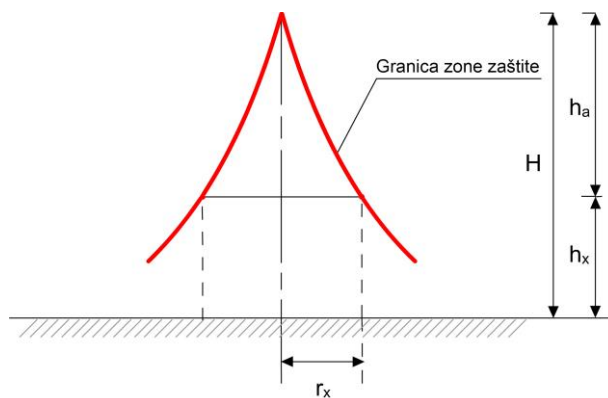


Slika 2.5: Zona zaštite četiri štapne hvataljke

### 2.1.5 Zona zaštite jednog užeta

Širina zone zaštite jednog užeta prikazana je na slici 2.6 i određuje se prema izrazu [6]:

$$r_x = \frac{0,8 \cdot h_a}{1 + \frac{h_x}{H}}, \text{ za } H \leq 30 \text{ m} \quad (2.6)$$

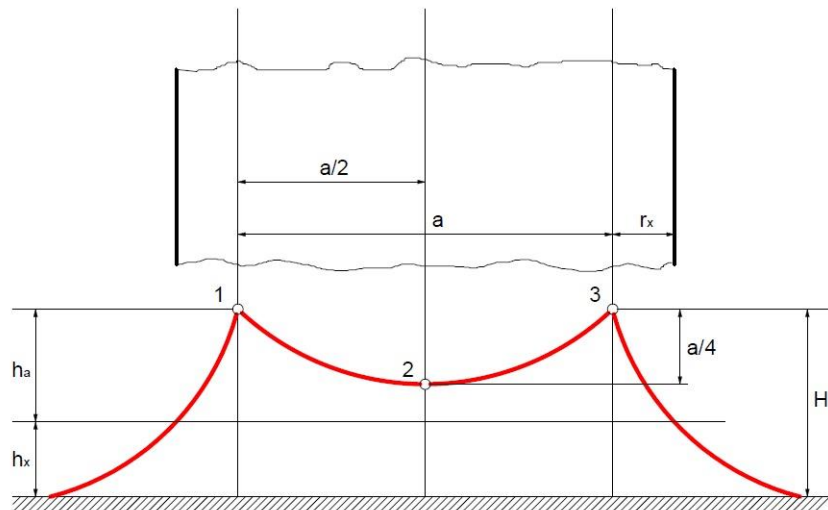


Slika 2.6: Zona zaštite jednog zaštitnog užeta

Sve oznake imaju isto značenje kao i u izrazu (2.1).

### 2.1.6 Zona zaštite ostvarena primenom dva zaštitna užeta

Zona zaštite ostvarena primenom dva zaštitna užeta obuhvata prostor ispod luka koji dodiruju oba zaštitna užeta, čiji je centar iznad užadi (slika 2.7).



Slika 2.7: Zona zaštite dva zaštitna užeta

## 2.2 Trenutno stanje u oblasti zaštite elektroenergetskih objekata od atmosferskog pražnjenja u svetu

Prihvatni sistem gromobranske instalacije postrojenja u svetu se izvodi pomoću gromobranskih elemenata u vidu štapnih hvataljki i zaštitnih užadi ili najčešće kao kombinacija ova dva tipa gromobranskih elemenata. Prema Hajlemanu [3], zaštita transformatorskih i razvodnih postrojenja u distributivnim mrežama u celom svetu se izvode primenom štapnih hvataljki na portalima ili stubovima. Razlog je relativno mala površina postrojenja. Za zaštitu postrojenja koja zauzimaju veću površinu, kao što je slučaj u postrojenjima u prenosnim mrežama, koriste se i zaštitna užad. Ona, u odnosu na štapnu hvataljku, ostvaruju bolju zaštitu. Pri korišćenju zaštitnih užadi postoji bojazan od kidanja zaštitnog užeta i pada na opremu, kada je položaj takav da je zaštitno uže iznad opreme [3].

Kada se radi o zaštiti koja se primenjuje u svetu, razlika u odnosu na Republiku Srbiju je u formiranju modela zone zaštite postrojenja. Neki od modela koji se koriste u svetu opisani su u nastavku rada jednačinama od (2.7) do (2.11), tabelom 2.1 i slikama 2.8 i 2.9.

Prema [2] u svetu se koriste tri metoda za procenu zone zaštite postrojenja od atmosferskog pražnjenja, i to su:

1. Metod zaštitnog ugla,
2. Metod empirijskih krivih,

### 3. Elektrogeometrijski metod.

Iz prethodnih iskustava se može zaključiti da su ova tri metoda najviše korišćeni pri konstrukciji zone zaštite od atmosferskog pražnjenja u postrojenje [3].

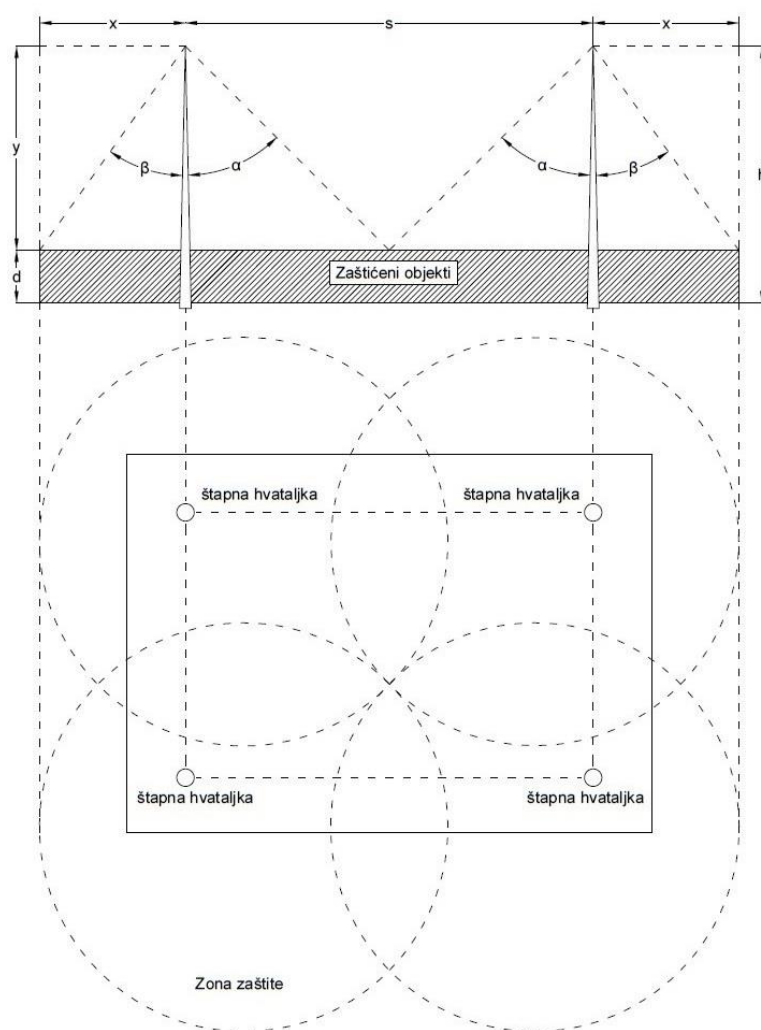
U zavisnosti od lokacije postrojenja koje treba zaštititi od atmosferskog pražnjenja, razlikuje se i broj grmljavinskih dana na godišnjem nivou  $T_d$  (koji se dobija iz izokerauničke karte posmatranog regiona), kao i izrazi za proračun gustine atmosferskog pražnjenja na godišnjem nivou  $N_g$  ( $1/\text{km}^2\text{god}$ ). U tabeli 2.1 predstavljeni su predloženi izrazi za izračunavanje  $N_g$  u zavisnosti od lokacije, i u zavisnosti od izvora, a prema [2].

Tabela 2.1: Empirijski izrazi za proračun gustine atmosferskog pražnjenja  $N_g$  na godišnjem nivou

<i>Lokacija</i>	$N_g$ ( $1/\text{km}^2\text{god}$ )	<i>Izvor</i>
Svet (umerene klimatske oblasti)	$0,04T_d^{1,25}$	Anderson [9 - 11]
Meksiko	$0,024 T_d^{1,12}$	IEEE Std 1410-2010 [12]
Brazil	$0,03 T_d^{1,12}$	IEEE Std 1410-2010 [12]
Kolumbija	$0,0017 T_d^{1,56}$	IEEE Std 1410-2010 [12]
Južna Afrika	$0,04 T_d^{1,25}$	Eriksson [13]
Švedska	$0,004 T_d^2$	Muller-Hillebrand [14]
Velika Britanija	$0,0026 T_d^{1,9}$	Stringfellow [15]
Severna Amerika	$0,11 T_d$	Horn and Ramsey [16]
Južna Amerika	$0,17 T_d$	Horn and Ramsey [16]
SAD	$0,10 T_d$	Anderson et al. [17]
SAD	$0,15 T_d$	Brown and Whitehead [18]
Rusija	$0,036 T_d^{1,3}$	Kolokolov and Pavlova [19]

Kao što je rečeno u prethodnom delu, istorijski, prvi metodi za projektovanje zaštite postrojenja od direktnog udara groma su metod zaštitnog ugla, izražen preko fiksnih uglova, i empirijske krive, dobijene na osnovu istraživanja na modelima [2]. Izrazi koji se koriste u Srbiji su usvojeni prema Andersonu [9 - 11].

Metod zaštitnog ugla predstavlja pogodnu aproksimaciju granica zone zaštite od atmosferskih pražnjenja u postrojenje. Ovaj metod počeo je najranije da se koristi za određivanje zone zaštite pri atmosferskom pražnjenju [20]. Na slici 2.8 je predstavljena zona zaštite po metodu zaštitnog ugla ako se kao gromobranski elementi prihvatnog sistema koriste štapne hvataljke.

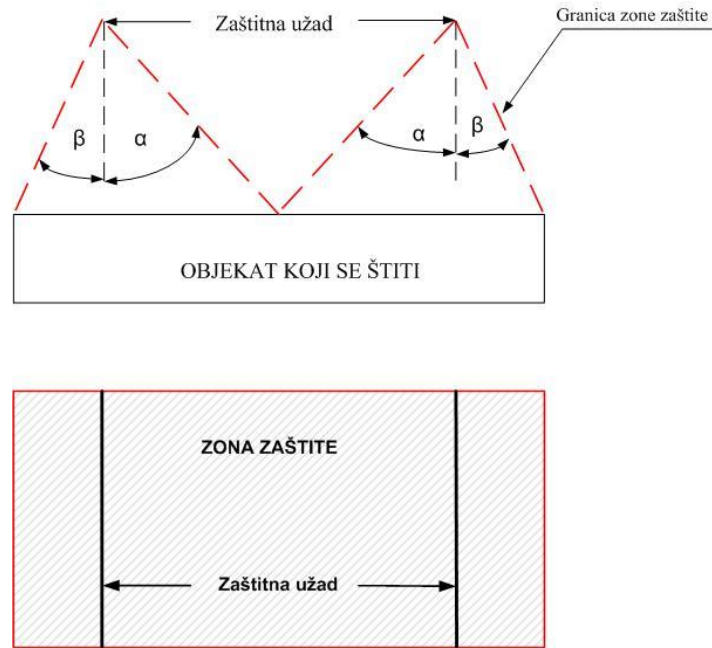


Slika 2.8: Metod zaštitnog ugla za četiri štapne hvataljke

Na slici 2.9 je predstavljena zona zaštite po metodu zaštitnog ugla ako se kao gromobranski elementi prihvatnog sistema postrojenja koriste zaštitna užad.

Za ugao  $\beta$  najčešće korišćene vrednosti su  $30^\circ$  i  $45^\circ$ , dok je za ugao  $\alpha$  najčešće korišćena vrednost  $45^\circ$ . Ako se u projektovanju gromobranske instalacije koristi metod zaštitnog ugla prilikom određivanja zone zaštite treba imati u vidu visinu štice objekta [21]. Zaštitni ugao se smanjuje kako se povećava visina štice objekta. Prema [21] zaštitni ugao je između  $40^\circ$  i  $45^\circ$  za objekte visine do 15 m,  $30^\circ$  za objekte visine između 15 m i 25 m i manje od  $20^\circ$  za objekte do 50 m visine.





Slika 2.9: Metod zaštitnog ugla za zaštitnu užad

Metodi empirijskih krivih koriste se prema [22 - 24] da se odredi broj, lokacija i visina gromobranskih elemenata (štapna hvataljka i zaštitno uže).

Prema Hajlemanu [3], postoji nekoliko izrazitih nedostataka koji su svojstveni empirijskim modelima. Prvi je da je osnova na kojoj su nastali, eksperiment u laboratoriji, nedovoljno adekvatna zbog prirode dugih lukova, koji nastaju prilikom atmosferskog pražnjenja. Drugi važan nedostatak je teškoća u vizualizaciji zone zaštite, naročito u slučaju štapnih hvataljki nejednakih visina. Treći nedostatak je da u ovim istraživanjima nije uvažavan uticaj visine objekta. Ovi modeli su u svetu korišćeni do pedesetih godina, mada se ponegde koriste i u današnje vreme. Takav slučaj je, kao što je prikazano u prethodnom delu, i sa Republikom Srbijom.

Razvojem EGM, revidirani su klasični metodi, ali je veliki korak predstavljao Lijev (Ralph Lee) model kotrljajuće sfere [25 - 27] zasnovan na udarnom rastojanju. Generalno, primenom EGM, priroda luka, bolje rečeno njegov poslednji skok, uzeta je u obzir mnogo bolje nego do tada. Osnovna ideja metoda kotrljajuće sfere bila je da se poboljša vizuelizacija zone zaštite.

Osnovna pretpostavka EGM-a je da je dužina poslednjeg skoka skokovitog lidera srazmerna amplitudi struje pražnjenja [5]. Maksimalno rastojanje koje skokoviti lider može da pređe u svom poslednjem skoku naziva se udarnim rastojanjem i

obeležava se sa  $R_{ud}$ , a izražava se u [m]. Neposredno pre poslednjeg skoka se javljaju uzlazni strimeri sa objekata na zemlji i silazni strimeri iz glave skokovitog lidera. Njihovim razvojem stvara se povezani lider koji obrazuje kanal glavnog pražnjenja. Ako je električno polje izazvano prisustvom glave skokovitog lidera dovoljno jako, dolazi do spajanja silaznih i uzlaznih strimera i obrazuje se glavno pražnjenje. Ako polje nije dovoljno jako, tada će skokoviti lider imati još jedan skok u slobodan prostor, pre konačnog skoka do objekta na zemlji. Udarno rastojanje zavisi od električnog polja usled prisustva glave skokovitog lidera, a intenzitet električnog polja zavisi od količine elektriciteta koju nosi kanal skokovitog lidera. Amplituda struje pražnjenja takođe zavisi od ove količine elektriciteta. Opšti izraz za udarno rastojanje [5] u funkciji amplitude atmosferskog pražnjenja je dato relacijom:

$$R_{ud} = k \cdot I^n \quad (2.7)$$

gde su  $k$  i  $n$  empirijske konstante i imaju vrednosti  $k = 6,72$  i  $n = 0,8$  [5],

$I$  – struja atmosferskog pražnjenja u [kA],  $R_{ud}$  – udarno rastojanje u [m]

Atmosfersko pražnjenje u postrojenje je složen proces. Postoji dosta predloženih matematičkih modela za proračun udarnog rastojanja koji daju različite, često zbunjujuće rezultate. Neki od predloženih izraza za proračun udarnog rastojanja dati su u nastavku.

Udarno rastojanje prema Darvenizi [28] predstavljeno je sledećom jednačinom:

$$R_{ud} = 2 \cdot I + 30 \cdot (1 - e^{-I/6,8}) \quad (2.8)$$

gde je  $I$  struja atmosferskog pražnjenja u [kA], a  $R_{ud}$  – udarno rastojanje u [m].

Formule za proračun udarnog rastojanja, predložene od strane nekih autora [28 - 33], prikazane su u tabeli 2.2. Rezultati za udarna rastojanja  $R_{ud}$  pri struji atmosferskog pražnjenja od  $I = 5$  kA prikazani su u tabeli 2.3.

Tabela 2.2: Različiti izrazi za udarna rastojanja

<b>Udarno rastojanje <math>R_{ud}</math> (m)</b>	<b>Autor</b>	<b>Izvor</b>
$R_{ud} = 2 \cdot I + 30(1 - e^{-I/6,8})$	Darveniza	[28]
$R_{ud} = 10 \cdot I^{0,65}$	Love	[29 – 30]
$R_{ud} = 9,4 \cdot I^{2/3}$	Whitehead	[31]
$R_{ud} = 8 \cdot I^{0,65}$	IEEE	[32]
$R_{ud} = 3,3 \cdot I^{0,78}$	Suzuki	[33]

Tabela 2.3: Udarne rastojanja određena primenom izraza iz tabele 2.2 pri struji atmosferskog pražnjenja od  $I = 5$  kA

<i>Autor</i>	<i>Udarne rastojanje <math>R_{ud}</math> (m)</i>
Darveniza	15,66
Love	28,47
Whitehead	27,63
IEEE	22,77
Suzuki	11,58

Predstavljeni izrazi za udarne rastojanje  $R_{ud}$ , mogu dati rezultate koji se razlikuju čak i do 2 puta, kao što je primer sa udarnim rastojanjima prema autorima Loveu (Love) i Darvenici (Darveniza). Radna grupa IEEE je usvojila izraz za udarne rastojanje koji daje manju vrednost nego izrazi koje su predložili autori Love i Vajthed (Whitehead) kao što je prikazano u tabeli 2.3.

Prema [29] verovatnoća da će struja atmosferskog pražnjenja u zaštitnu užad, fazne provodnike i štapne hvataljke biti veća od struje  $I$  (kA) data je izrazom:

$$P(I) = \frac{1}{1 + (I/31)^{2,6}} \quad (2.9)$$

Centralna vrednost struje atmosferskog pražnjenja u zaštitnu užad, fazne provodnike i štapne hvataljke prema Andersonu [29] je 31 kA, odnosno verovatnoća da će struja atmosferskog pražnjenja biti veća odnosno manja od 31 kA, je 0,5 (50%).

Prema [34] verovatnoća da će struja atmosferskog pražnjenja u zemlju biti veća od struje  $I$  (kA) data je izrazom:

$$P(I) = \frac{1}{1 + (I/24)^{2,6}} \quad (2.10)$$

Centralna vrednost struje atmosferskog pražnjenja u zemlju prema [34] je 24 kA, odnosno verovatnoća da će struja atmosferskog pražnjenja biti veća odnosno manja od 24 kA je 0,5 (50%).

Prema [2] izdvajaju se tri oblika EGM.

U prvom obliku EGM, prema [35], polazi se od sledećih činjenica:

1. Pretpostavlja se da se atmosfersko pražnjenje prostire u vertikalnom pravcu,

2. Uzimaju se u obzir različita udarna rastojanja za zaštitno uže, štapnu hvataljku i zemlju,
3. Vrednost struje atmosferskog pražnjenja od 24 kA je uzeta kao srednja vrednost [35].

Udarno rastojanje se definiše izrazom:

$$R_{ud} = 8 \cdot k \cdot I^{0,65} \quad (2.11)$$

gde je:

$I$  – struja atmosferskog pražnjenja u [kA]

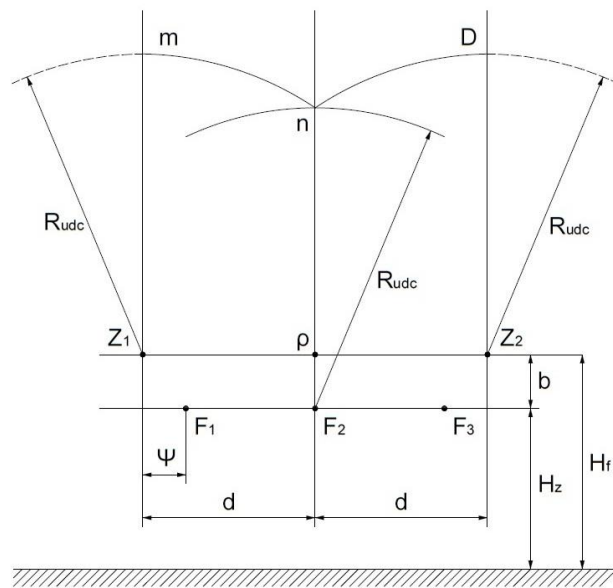
$k$  – koeficijent koji zavisi od toga da li je udarno rastojanje računato prema štapnoj hvataljci, zaštitnom užetu ili zemlji.

Prema [35] usvaja se vrednost za koeficijent  $k = 1$  za zemlju i zaštitno uže, a  $k = 1,2$  za štapnu hvataljku.

Struje atmosferskog pražnjenja se kreću u širokim granicama od 1 kA do 200 kA. Prema EGM zona zaštite štapne hvataljke ili zaštitnog užeta zavisi od struje atmosferskog pražnjenja. Ako zaštitno uže štiti visokonaponske elemente od struje atmosferskog pražnjenja  $I$ , to ne znači da će zaštitno uže štititi iste visokonaponske elemente od struje atmosferskog pražnjenja koja je manja od  $I$ . Ova činjenica je tačna jer je za manju struju manje i udarno rastojanje, a samim tim i ostvarena zona zaštite. Dakle, potrebno je da ostvarena zona zaštite bude funkcionalna za struje atmosferskog pražnjenja koje se pojavljuju sa velikom verovatnoćom.

Na slici 2.10 je prikazan slučaj kada dva zaštitna užeta  $Z_1$  i  $Z_2$  štite tri fazna provodnika  $F_1$ ,  $F_2$  i  $F_3$  od atmosferskog pražnjenja.

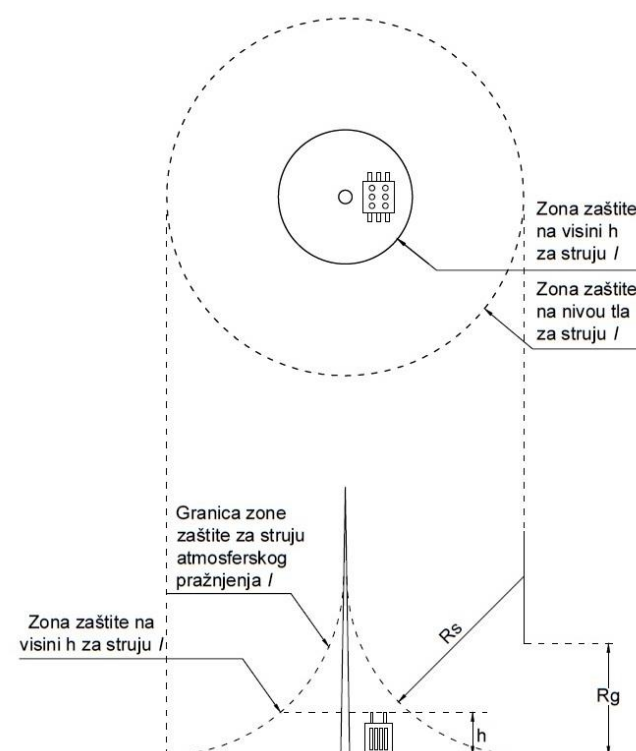
$R_{udc}$  predstavlja kritično udarno rastojanje predstavljeno jednačinom 2.11 umanjeno za 10% zbog sigurnosti zaštite faznih provodnika od atmosferskog pražnjenja. Kružnice koje su konstruisane sa centrima u  $Z_1$ ,  $Z_2$  i  $F_2$ , a poluprečnika  $R_{udc}$  prikazuju adekvatno instaliranu gromobranksku zaštitu u vidu zaštitnih užadi iznad faznih provodnika  $F_1$ ,  $F_2$  i  $F_3$ . Kružnice poluprečnika  $R_{udc}$  konstruišu se sa centrom u tačkama postavljanja zaštitnih užadi  $Z_1$ ,  $Z_2$  i faznog provodnika  $F_2$  za slučaj atmosferskog pražnjenja između dva zaštitna užeta, kao što je prikazano na slici 2.10.



Slika 2.10: Zona zaštite realizovana pomoću dva zaštitna užeta [35]

U drugom obliku EGM, prema [37], udarno rastojanje uzima u obzir i struju atmosferskog pražnjenja i visinu objekta koji se štiti. Zona zaštite se prema ovom obliku EGM-a dobija metodom kotrljajuće sfere.

Struja atmosferskog pražnjenja za koju su dimenzionisani visokonaponski elementi na podnosivi napon izolacije obeležena je na slici 2.11 sa  $I$ . Za struju atmosferskog pražnjenja  $I$  proračunava se udarno rastojanje  $R_u$  prema izrazu (2.11). Metod kotrljajuće sfere podrazumeva dobijanje zone zaštite kao geometrijsko mesto tačaka u kojima imaginarna sfera, poluprečnika  $R_u$ , dodiruje štapne hvataljke i/ili zaštitnu užad i horizontalnu podlogu. Na slici 2.11 je prikazana granica zone zaštite za struju atmosferskog pražnjenja  $I$ . Isprekidanom horizontalnom linijom prikazan je nivo visine šticeenog visokonaponskog elementa  $h$ . Atmosferska pražnjenja čije su struje veće od dimenzionisane struje  $I$  će se desiti u hvataljku i biće efikasno sprovedene štapnom hvataljkom do uzemljivača. Atmosferska pražnjenja čije su struje manje od dimenzionisane struje  $I$  mogu da ugroze visokonaponske elemente zbog manje vrednosti udarnog rastojanja, a samim tim i manje površine ostvarene zone zaštite.



Slika 2.11: Zona zaštite postrojenja ostvarena pomoću jedne štapne hvataljke

Može se zaključiti da je teže štititi visokonaponske elemente od manjih struja atmosferskih pražnjenja nego od većih struja atmosferskih pražnjenja.

Treći oblik EGM prema [2] je predložen od strane autora Eriksona. Erikson je prvi autor koji je kasnih 80-tih godina 20-tog veka predložio izraze za proračun udarnog rastojanja koji u razmatranje uzimaju i dimenzije štice objekta  $H$  [38].

Za praktičnu primenu za visoke objekte čija je visina u opsegu od 10 m do 60 m, prema [5], može se koristiti uprošćeni izraz:

$$R_{ud} = 0,84 \cdot H^{0,6} \cdot I^{0,74} \quad (2.12)$$

gde su:

$R_{ud}$  – udarno rastojanje u [m]

$H$  – visina štice objekta u [m]

$I$  – očekivana struja atmosferskog pražnjenja u [kA] u dobro uzemljeni objekat.

Fazni provodnici i zaštitna užad su horizontalni cilindrični objekti za koje je raspodela električnog polja drugačija nego kod visokih objekata, pa je prema [2] dobijen izraz za udarno rastojanje faznih provodnika i zaštitne užadi:

$$R_{ud} = 0,67 \cdot H^{0,6} \cdot I^{0,74} \quad (2.13)$$

gde su:

$R_{ud}$  – udarno rastojanje u [m]

$H$  – visina zaštitnog užeta (faznog provodnika) u [m]

$I$  – očekivana struja atmosferskog pražnjenja u [kA] u dobro uzemljeni objekat.

Proračun udarnih rastojanja i modelovanje zone zaštite su ilustrovani u [39], gde je prikazan razvijeni originalni softverski alat "*VN Postrojenja*" baziran na AutoCAD-u i elementima ekspertskeg sistema. Značaj tog softverskog alata ogleda se u odličnoj vizualizaciji zone zaštite, kao i u opštosti izbora modela. Naime, moguće je izabrati jedan od više modela udarnog rastojanja, koji su najviše korišćeni u svetskoj praksi.

Većina postrojenja se štite od atmosferskog pražnjenja kombinacijom štapnih hvataljki i zaštitnih užadi. Treba voditi računa o mestu postavljanja ovih gromobraskih elemenata, jer je potrebno naći optimalnu visinu i mesto postavljanja, a da se ne ometa rad samih visokonaponskih elemenata unutar postrojenja [2].

Prema Hajlemanu [3], postoji nekoliko otvorenih problema vezanih za EGM, za koje se očekuju rešenja. Iz tog razloga, današnja istraživanja iz oblasti zaštite postrojenja od direktnog atmosferskog pražnjenja usmerena su ka sledećim problemima:

1. Vrednost struje atmosferskog pražnjenja za koju treba izvoditi projektovanje zaštite od atmosferskog pražnjenja. Opšta je saglasnost da ta struja treba da bude veća od kritične struje, najmanje struje koja izaziva preskok u postrojenju, ukoliko pražnjenje mimoide zaštitu. Ovo pitanje moguće je rešiti samo uzimanjem u obzir rizik od gubitka ljudskih života i ekonomskog rizika usled oštećenja i drugih gubitaka. Do sada, nijedan model za zaštitu postrojenja nije uzimao u obzir rizik. Zbog te činjenice se kao jedan od osnovnih ciljeva ove disertacije nameće ostvarivanje doprinosa u tom smeru;

2. Vizuelizacija zone zaštite crtanjem dvodimenzionih slika je neadekvatna – teška i nepregledna. Problem se pojačava ukoliko visine hvataljki i užadi nisu iste, ili ako je geometrija nesimetrična. Doprinos u ovoj disertaciji odnosi se na primenu razvijenog originalnog softverskog alata "*VN Postrojenja*" za vizuelizaciju zone zaštite, kao i automatske analize velikog broja varijanti korišćenjem naprednih tehnika u AutoCAD-u (Visual Basic);

3. Nedostatak postojećih EGM je i potreba za iterativnim izračunavanjem udarnog rastojanja, zbog toga što udarno rastojanje prema užetu ili vrhu hvataljke zavisi od struje pražnjenja;

4. Različiti tretman prihvatne (atraktivne) površine, površine sa koje se atmosfersko pražnjenje usmerava u objekat, u različitim dokumentima.

Unapređen EGM prvi je predstavio Eriksson [37, 38, 40] koji uzima u obzir i visinu štice objekta, amplitudu struje atmosferskog pražnjenja i pojačanje intenziteta polja koje je opisano faktorom pojačanja polja  $k$ . Ovaj metod se naziva *Collection Volume Method* (CVM) koji je detaljno objašnjen u [37, 41, 42]. On, kao i neki drugi modeli, spada u tzv. alternativne metode.

Da bi se mogao primeniti CVM metod uspostavljen je sledeći odnos između udarnog rastojanja prema zemlji  $R_z$  i udarnog rastojanja prema štice objektu:

$$R_z = k \cdot R_{ud} \quad (2.14)$$

gde su:

$R_z$  – udarno rastojanje prema zemlji u [m]

$k = 0,64 \div 1$  – korekcija udarnog rastojanja prema zemlji, odnosno faktor pojačanja polja.

U [43] je analizirano udarno rastojanje u zavisnosti od gustine naelektrisanja kanala atmosferskog pražnjenja prema izrazu:

$$R_{ud} = 105 \cdot \rho^{1,19} \quad (2.15)$$

Zavisnost amplitude struje atmosferskog pražnjenja od gustine naelektrisanja kanala atmosferskog pražnjenja predstavljena je izrazom:

$$I = k \cdot \mathcal{G}_r \cdot \rho \quad (2.16)$$

gde je:

$\mathcal{G}_r$  – brzina prostiranja kanala atmosferskog pražnjenja koja se kreće u granicama  $0,2 \cdot 10^8 \div 1,6 \cdot 10^8$  m/s,

$k$  – koeficijent koji opisuje u kojoj meri struja atmosferskog pražnjenja prati gustinu naelektrisanja kanala atmosferskog pražnjenja. Iz jednačina (2.15) i (2.16) dobija se zavisnost udarnog rastojanja i struje atmosferskog pražnjenja

$$R_{ud} = 0,438 \cdot I^{1,19} \quad (2.17)$$



Prema izrazu (2.17), predloženo udarno rastojanje je manje u odnosu na prethodno analizirana udarna rastojanja, što znači i da je predložena zona zaštite manja od prethodno analiziranih.

Osim Eriksonovog (Eriksson) modela poznatog pod originalnim nazivom "Collection volume method (CVM)/Field intensification factor method (FIFM)", metoda pojačanja polja, koji uzima u obzir zavisnost udarnog rastojanja od visine objekta, postoje još neki alternativni metodi. "Lider progression model" (LPM) – model napredovanja lidera [4], čiji su autori Delera (Dellera) i Garbanjati (Garbagnati), uzima u obzir napredovanje silaznog lidera u prostoru i vremenu, izračunavajući promenu električnog polja. Oni analiziraju i napredovanje uzlaznog lidera, primenom specijalnog softvera, kao i bočne udare groma. "Leader inception theory" (LIT) – Teorija nastanka lidera [44], autora Riska (Rizk) analizira aktivnu ulogu objekta pogođenog atmosferskim pražnjenjem. "Self-consistent leader inception and propagation model" (SLIM) – model nastajanja i prostiranja lidera [45 - 47], čiji su autori Bekera (Becerra) i Kurej (Cooray), izvode iterativnu geometrijsku analizu raspodele potencijala na uzemljenoj elektrodi sa ciljem simulacije nastajanja i prostiranja uzlaznog lidera. Međutim, svi ovi modeli su samo pomenuti jer nisu široko prihvaćeni. Prvi razlog je što su ekstremno teški za praktičnu primenu jer se zasnivaju na specijalnim softverima i složenoj teoriji. Drugi razlog je što su još u fazi istraživanja sa ciljem da realnije opišu proces atmosferskog pražnjenja. Zbog toga, oni nisu analizirani u disertaciji.

Gromobrani sa pojačanjem polja – tzv. "gromobrani sa ranim startovanjem", nisu prihvaćeni od stručne javnosti kao bolje rešenje od obične hvataljke jer je dokazano da tvrdnje na kojima se zasniva njihovo promovisanje ne važe. Zbog toga ni oni ne mogu biti korišćeni u zaštiti postrojenja od direktnog atmosferskog pražnjenja.

U literaturi [48] prikazana je 3D zona zaštite realizovana u softverskom alatu MATLAB, a prema modelu koji je primenjen i u [3]. Za razliku od [48], u ovoj disertaciji su modelovani u AutoCad-u 3D zona zaštite i postrojenje koje se štiti.

Postoje i razna druga moguća rešenja predstavljena od strane različitih autora. Kao predmet ovoga rada je proučavan generički model kao vid najnaprednijeg EGM – a, koji je detaljno opisan u nastavku rada.

### **3. MODELI ZA FORMIRANJE ZONE ZAŠTITE POSTROJENJA OD DIREKTNOG ATMOSFERSKOG PRAŽNJENJA ZASNOVANI NA TEORIJI UDARNOG RASTOJANJA**

Pri projektovanju elektroenergetskih objekata neophodno je formirati odgovarajuću gromobransku zaštitu [49, 50]. Sastavni deo ovog postupka predstavljaju određivanje i vizuelizacija zone zaštite koji se sprovode primenom različitih metoda [3, 36, 48-52]. Ovaj deo disertacije prikazuje primenu proširene verzije razvijenog originalnog softverskog alata [53], formiranog korišćenjem softverskog alata AutoCAD [56] i softverskog jezika Visual Basic [57], koji omogućava projektovanje gromobranske zaštite postrojenja primenom različitih modela, metoda i zaštitnih uređaja, na način pogodan za inženjersku praksu. Softverski alat omogućava određivanje i vizuelizaciju zone zaštite primenom geometrijskog i generičkog modela [52, 55]. Pored štapne hvataljke, kao uobičajenog zaštitnog uređaja, posebna pažnja usmerena je na uvažavanje uticaja zaštitnog užeta, čijim korišćenjem se ostvaruje efikasna zona zaštite postrojenja. Određivanje i vizuelizacija zone zaštite prihvatnog sistema gromobranske instalacije primenom generičkog modela ilustrovani su na primerima konkretnih postrojenja u poglavlju 7. Analiza osetljivosti zone zaštite urađena je u zavisnosti od vrste i dimenzija zaštitnih uređaja, amplitude struje atmosferskog pražnjenja i primenjenih metoda.

Izračunavanje udarnog rastojanja omogućava procenu verovatnoće atmosferskog pražnjenja u štice objekta, u ovom slučaju postrojenje. Takođe, ovim izračunavanjem se omogućava procena efikasnosti uzemljenja bilo da se radi o realizaciji prihvatnog sistema gromobranske zaštite u vidu štapnih gromobrana ili zaštitnih užadi.

Udarno rastojanje se može proračunati na tri načina [52]:

a) Geometrijski model

Proračun udarnog rastojanja uzima u obzir geometriju štice objekta, a ne i amplitudu struje atmosferskog pražnjenja. Ovaj jednostavan model proračuna udarnog rastojanja predstavlja osnovu međunarodnih standarda zbog svoje korisnosti i pogodnosti.

b) Elektrogeometrijski model (EGM)

Proračun udarnog rastojanja uzima u obzir samo struju atmosferskog pražnjenja i potpuno je nezavisan od geometrije štice objekta. Zbog primarnog uticaja struje

atmosferskog pražnjenja na amplitudu atmosferskih prenapona, ovaj metod je pronašao široku upotrebu u projektovanju gromobranske zaštite nadzemnih vodova.

c) Generički model

Proračun udarnog rastojanja uzima u obzir struju atmosferskog pražnjenja kao i geometriju štice objekta [51]. Ovakav način proračuna udarnog rastojanja daje jasniju i sveobuhvatniju sliku prilikom projektovanja gromobranske zaštite postrojenja.

### 3.1 Geometrijski model proračuna zone zaštite štapne hvataljke i zaštitnog užeta po metodi kotrljajuće sfere

Geometrijski metod je analiziran u poglavlju 2.1. Analizirani su izrazi za izračunavanje poluprečnika zone zaštite za štapnu hvataljku (izraz (2.1)) i poluprečnika zone zaštite za zaštitno uže (izraz (2.6)). U izrazima 2.1 i 2.6 figurišu različite visine od značaja za proračun poluprečnika zone zaštite, ali ne figurišu amplitude struja atmosferskih pražnjenja.

### 3.2 Elektrogeometrijski model (EGM) proračuna

EGM za razliku od geometrijskog metoda, baziran je na IEEE modelu koji za glavni parametar uzima amplitudu struje pražnjenja. Osnovna pretpostavka u ovom modelu je da je dužina poslednjeg skoka skokovitog lidera srazmerna amplitudi struje atmosferskog pražnjenja.

Neposredno pre poslednjeg skoka se javljaju uzlazni strimeri sa objekata na zemlji i silazni strimeri iz glave skokovitog lidera. Njihovim razvojem stvara se povezani lider koji obrazuje kanal glavnog pražnjenja. Mehanizam EGM prikazan je u poglavlju 2.2.

Sledećom jednačinom opisana je zavisnosti između potencijala glave skokovitog lidera pred zadnji skok  $V_l$  [MV] i amplitude struje glavnog pražnjenja u idealno uzemljen objekat  $I_0$  [kA] prema [5]:

$$V_l = 3,7 \cdot I_0^{2/3} \quad (3.1)$$

Na osnovu laboratorijskih ispitivanja izolacionih razmaka sklopnim prenaponima dobijen je izraz za udarno rastojanje  $R_u$  [m] prema [5]:

$$R_u = 1,4 \cdot V_l^{1,2} \quad (3.2)$$

Zamenom izraza (3.1) u izraz (3.2) se dobija opšti izraz za udarno rastojanje u funkciji amplitude atmosferskog pražnjenja u obliku:

$$R_u = k \cdot I_0^n \quad (3.3)$$

gde su  $k$  i  $n$  empirijske konstante čije su usvojene vrednosti  $k = 6,72$  i  $n = 0,8$  prema [5]. Vrednosti za  $k$  se kreću od 6 do 10, a za  $n$  od 0,65 do 0,8.

Izrazom (3.4) je data zavisnost udarnog rastojanja od visine voda, tako što se uzima u obzir uticaj intenziteta električnog polja na provodnicima i zaštitnom užetu na proces poslednjeg skoka prema [5]. Takođe izraz (3.4) opisuje modifikovani EGM jer uzima u obzir i visinu štice objekta.

$$R_u = I_0^{0,64} \cdot H^{(0,66+2 \cdot I_0 \cdot 10^{-4})} \quad (3.4)$$

gde su:

$H$  – visina objekta u [m]

$I_0$  – očekivana struja groma u dobro uzemljen objekat u [kA]

Izraz (3.4) važi za objekte visine do 500 m i za struje atmosferskog pražnjenja do 200 kA.

Za praktičnu primenu za istaknute objekte čija je visina u opsegu od 10 m do 60 m koristi se izraz (2.12) analiziran u poglavlju 2.2 dok za fazne provodnike i zaštitnu užad važi izraz (2.13).

Postoje mišljenja da su udarna rastojanja faznih provodnika i zaštitne užadi različita zbog većeg intenziteta električnog polja na zaštitnim užadima usled njihovog manjeg poprečnog preseka. Ako se usvoji da su udarna rastojanja ista kod faznih provodnika i zaštitnih užadi dolazi se do kritičnih rezultata.

### **3.3 Generički model proračuna zone zaštite štapne hvataljke i zaštitnog užeta po metodi kotrljajuće sfere**

Primena generičkog modela doprineće tačnijem određivanju zone zaštite postrojenja od direktnog atmosferskog pražnjenja. Ova pretpostavka zasniva se na suštini generičkog modela, baziranog na značajnom proširenju znanja o fizičkom modelu preskoka na dugim rastojanjima.

Prema generičkom modelu udarno rastojanje predstavlja funkciju amplitude struje atmosferskog pražnjenja i dispozicije postrojenja. Za zaštitu postrojenja od

atmosferskog pražnjenja potrebno je korigovati udarna rastojanja koja su prikazana u EGM koji tretira modelovanje zone zaštite gromobranske instalacije nadzemnih vodova. Kod nadzemnih vodova visine faznih provodnika (štićeni objekat) i zaštitne užadi (gromobranski element) se ne razlikuju značajno, tako da se pri analizi gromobranske zaštite nadzemnih vodova, a prema EGM, usvaja da su udarna rastojanja prema faznom provodniku i prema zaštitnom užetu približno jednaka. Na taj način se dobijaju kritičniji rezultati, a sve u cilju veće sigurnosti i zaštite od atmosferskih pražnjenja.

Prilikom dimenzionisanja gromobranske instalacije postrojenja ne može se pretpostaviti da su visine šticeh visokonaponskih elemenata jednake visini zaštitnih užadi ili štapnih hvataljki (gromobranskih elemenata). To je zato što se visine šticeh visokonaponskih elemenata kreću od malih visina (neposredno iznad tla) do velikih visina (bliske visini zaštitnih užadi). Zato se prilikom konstrukcije gromobranske zaštite prema generičkom modelu u razmatranje uzimaju tri udarna rastojanja: prema gromobranskom elementu (zaštitno uže ili štapna hvataljka)  $r_s$ , prema šticehnom postrojenju  $r_c$  i prema zemlji  $r_g$ .

U ovom delu disertacije razmatrani su izrazi [3], gde poluprečnici (širine) zone zaštite zavise od vrednosti amplitude struje atmosferskog pražnjenja i dimenzija šticehnog objekta.

Poluprečnik (širina) zone zaštite  $r_x$  izračunava se prema izrazu:

$$r_x = \sqrt{r_s^2 - (r_g - H)^2} - \sqrt{r_c^2 - (r_g - h_x)^2} \quad (3.5)$$

gde su:

$H$ – ukupna visina objekta zajedno sa štapnom hvataljkom u [m]

$h_x$ – visina na kojoj se traži poluprečnik zone zaštite  $r_x$  u [m]

$r_g$ – udarno rastojanje skokovitog lidera prema zemlji u [m]

$r_c$  – udarno rastojanje skokovitog lidera do postrojenja u [m]

$r_s$  – udarno rastojanje skokovitog lidera do gromobranskog elementa u [m]

Izrazi za  $r_c$  i  $r_s$  su:

$$r_c = \gamma_c \cdot r_g \quad (3.6)$$

$$r_s = \gamma_s \cdot r_g \quad (3.7)$$

gde su  $\gamma_s$  i  $\gamma_c$  koeficijenti koji zavise od visina  $H$  i  $h_x$  i prikazani su u tabeli 3.1.

U tabeli 3.1 su još prikazani i izrazi za proračun udarnog rastojanja, predloženi od strane više autora, prema izrazu:

$$r_g = E \cdot I^f \quad (3.8)$$

gde su  $E$  i  $f$  koeficijenti čije vrednosti su date u [3].

Tabela 3.1: Formule za izračunavanje udarnog rastojanja

<i>Autor</i>	<i>E</i>	<i>f</i>	$\gamma_s(H \geq 18 \text{ m})$	$\gamma_s(H < 18 \text{ m})$	$\gamma_c(h_x \geq 18 \text{ m})$	$\gamma_c(h_x < 18 \text{ m})$
Young	27	0,32	$\frac{444}{462 - H}$	1	$\frac{444}{462 - h_x}$	1
Love	10	0,65	1	1	1	1
CIGRE	6,4	0,75	$1 + \frac{H - 18}{108}$	1	$1 + \frac{h_x - 18}{108}$	1
IEEE-1995	8	0,65	1	1	1	1

Na slici 3.1 prikazane su veličine korišćene u izrazima (3.5) do (3.8) kada je ispunjen uslov:

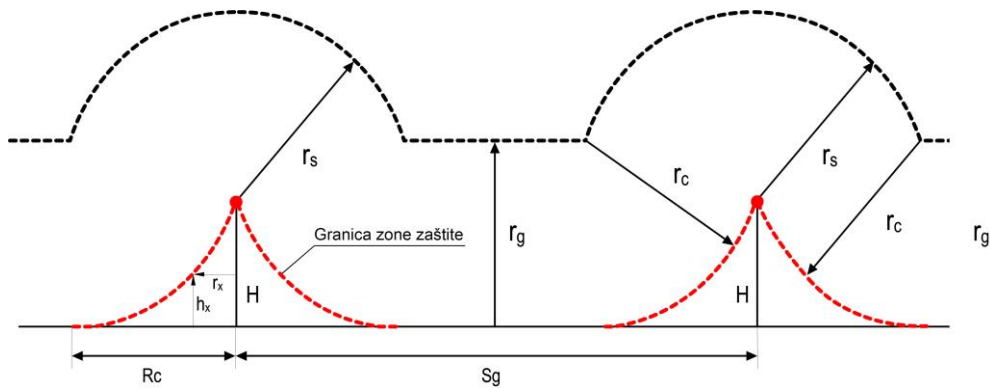
$$S_g > 2 \cdot R_C \quad (3.9)$$

gde su:

$S_g$  – međusobno rastojanje između dva zaštitna užeta u [m]

$R_C$  – poluprečnik zone zaštite na nivou zemlje kada je  $h_x = 0$  m

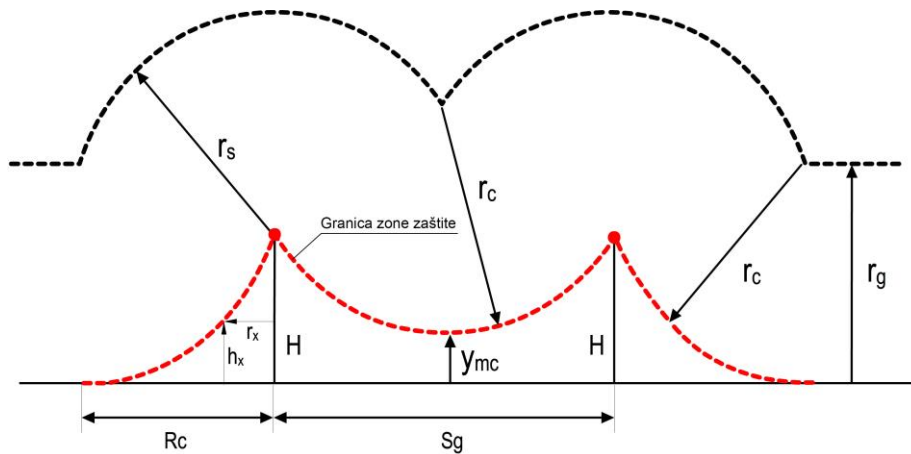
Da bi se konstruisala zona zaštite po metodi kotrljajuće sfere, potrebno je odrediti centar cilindrične oblasti u preseku kruga konstruisanog sa centrom u tački postavljanja zaštitnog užeta poluprečnika  $r_s$  i prave koja je paralelna sa tlom, a na rastojanju  $r_g$  od tla. Dalje se konstruiše kružnica poluprečnika  $r_c$  koja obuhvata tačku postavljanja zaštitnog užeta do preseka sa tlom. Oblast unutar dobijene figure predstavlja zonu zaštite kao što je prikazano na slici 3.1. Bilo koji objekat i/ili visokonaponski element koji se nalazi unutar zone zaštite smatra se zaštićenim od atmosferskog pražnjenja. Na osnovu slike 3.1 može se zaključiti da, kada je ispunjen uslov dat izrazom (3.9), preseci kružnica poluprečnika  $r_c$  se ne seku sa pravom koja je paralelna sa tlom na rastojanju  $r_g$ , što znači da bi se sva atmosferska pražnjenja završavala u zaštitnu užad i ne bi bilo moguće atmosfersko pražnjenje u zemlju.



Slika 3.1: Zona zaštite 2 zaštitna užeta (generički model), za  $S_g > 2 \cdot R_c$

Na slici 3.2 prikazana je zona zaštite gromobranske instalacije koja je realizovana sa dva zaštitna užeta koja se nalaze na rastojanju  $S_g < 2 \cdot R_c$ .

U ovom slučaju dobijena zona zaštite je definisana kružnicom poluprečnika  $r_c$  čiji se centar dobija u preseku kružnica poluprečnika  $r_s$  sa centrom u tački postavljanja zaštitne užadi. Sa slika 3.1 i 3.2 zaključuje se da je zona zaštite ostvorena pomoću dva zaštitna užeta veća kada je ispunjen uslov:  $S_g < 2 \cdot R_c$ .

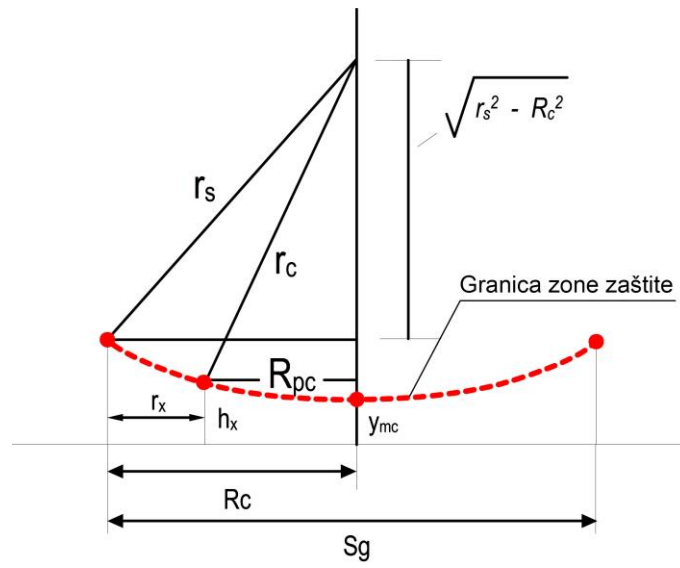


Slika 3.2: Zona zaštite 2 zaštitna užeta (generički model), za  $S_g < 2 \cdot R_c$

Zona zaštite na slici 3.3 je definisana poluprečnikom zone zaštite zaštitnog užeta  $r_x$ , na visini  $h_x$ , odnosno rastojanjem  $R_{pc}$ .

Izraz 3.10 predstavlja izraz za izračunavanje rastojanja  $R_{pc}$ .

$$R_{pc} = \sqrt{r_c^2 - (H - h_x + \sqrt{r_s^2 - R_c^2})^2} \quad (3.10)$$



Slika 3.3: Zona zaštite između dva zaštitna užeta, (generički model), za  $S_g < 2 \cdot R_c$



#### **4. METODOLOGIJA PRORAČUNA RIZIKA KVARA I TROŠKOVA GUBITAKA KOD POSTROJENJA SA PRIMENOM FUZZY LOGIKE**

Pojam rizika može se tretirati kao kvantitativni i kvalitativni opis opasnosti tj. mera opasnosti ili nivo opasnosti. Rizici od kvarova su prisutni u mnogim tehnološkim (tehničkim) sistemima, pa tako i u sistemima zaštite od kvarova postrojenja usled atmosferskih pražnjenja. Neadekvatno sagledavanje rizika kvara usled atmosferskog pražnjenja u postrojenje uvek rezultira neplaniranim troškovima za oporavak postrojenja, a često i nekontrolisanim izdacima za namirenje direktnih i indirektnih šteta koje se moraju nadoknaditi. Prilikom određivanja rizika kvara potrebno je izračunati verovatnoću pojave neželjenog događaja i težinu njegove posledice.

Pojedini kvarovi u postrojenju usled atmosferskih pražnjenja mogu rezultirati ekstremno velikim štetama kako za EES u celini, tako i za potrošače kao korisnike EES. Jedan od uzroka kvara na visokonaponskim elementima unutar postrojenja jeste i atmosfersko pražnjenje koje može izazvati enormne štete usled otkaza energetskih transformatora ili pojedinih visokonaponskih elemenata. Analiza zasnovana na utvrđivanju svih mogućih uzroka, njihovo rangiranje u smislu verovatnoće pojave i stavljanje u korelaciju sa mogućom štetom je aktivnost na koju se mora obratiti velika pažnja.

Zasnovano na unapred definisanim kriterijumima, kroz postupak proračuna rizika, može se utvrditi da li su u konkretnim slučajevima rizici prihvatljivi ili ne. Za smanjenje rizika potrebno je definisati odgovarajuće korektivne mere čijom primenom će izračunati rizik biti moguće smanjiti na nivo niži od prihvatljivog, koji je definisan standardima. U postupku determinacije korektivnih mera se, pored tehničkog pristupa, mora uvažiti i finansijski aspekt. Ovaj postupak svakako mora rezultirati izborom optimalnog broja i vrste tehno-ekonomski prihvatljivih radnji kojima će se stanje sistema sa aspekta rizika dovesti na unapred ustanovljen i standardizovan nivo. Upravljanje rizikom je moguće jedino ako se rizik može kvantifikovati. Procedura analize rizika zasniva se načelno na sledećim koracima:

1. Sistematska procena opasnosti (štetni uticaj) za postrojenje od značaja,
2. Procena težine posledica,
3. Procena verovatnoće otkaza,
4. Formiranje matrice rizika.

Definisanje skupa opasnosti i njihova identifikacija zasniva se na ekspertskim znanjima i dobrom poznavanju konfiguracije postrojenja.

Za potrebe menadžmenta elektroprivrednih organizacija veoma je važno imati jasnu sliku rizika kvara kod postrojenja uzrokovanu atmosferskim pražnjenjima, kako za postrojenja pri transformatorskim stanicama, postrojenja pri konvencionalnim izvorima energije, a posebno u svetlu mogućeg proširenja na obnovljive izvore energije. Pre svega se misli na ugroženost vetrofarmi od atmosferskog pražnjenja, zbog stalnog trenda povećanja visine vetroturbina. Određene nesigurnosti su poslužile kao osnov za uvođenje tehnike veštačke inteligencije u ovu analizu, kao što je fuzzy pristup. Razvijeni originalni softverski alat "*Risk management and cost effective by IEC 62305*" daje mogućnost sagledavanja tehničkih i ekonomskih karakteristika postrojenja u svetlu ugroženosti od atmosferskih prenapona na način pogodan za inženjersku praksu.

Internacionalna elektrotehnička komisija (*International Electrotechnical Commission – IEC*) je u okviru rada Tehničkog komiteta TC 81 usvojila standard za zaštitu od atmosferskog pražnjenja IEC-62305. Ovaj standard sastoji se od četiri dela [1, 58-60] u kojima su prezentovani principi u projektovanju zaštite objekata i živih bića od atmosferskog pražnjenja. U odnosu na prethodne standarde, prikazan je novi pristup upravljanju rizikom od atmosferskog pražnjenja, u daleko širem smislu nego što je samo fizičko oštećenje objekata pogođenih atmosferskim pražnjenjem [1]. Standard IEC 62305 tretira rizike usled atmosferskog pražnjenja tipa oblak-zemlja (*CG-cloud to ground*) koji i predstavlja najvažniji tip atmosferskog pražnjenja kada je u pitanju gromobranska zaštita elektroenergetskih objekata. To je atmosfersko pražnjenje kod kojeg skokoviti lider pogađa objekat na zemlji [61].

Standard IEC-62305 sastoji se od četiri dela:

- IEC-62305-1 *Protection of structures against lightning*, General principles, predstavlja osnovne principe, pojmove i klasifikuje štetu atmosferskog pražnjenja

- IEC-62305-2 *Risk management*, predstavlja metod kojim se procenjuje prouzrokovana šteta atmosferskim pražnjenjem kao i metod kojim se procenjuju pojedinačni i zbirni rizici od atmosferskog pražnjenja
- IEC-62305-3 *Physical damage and life hazard*, odnosi se na mere protiv povreda živih bića i predstavlja smernice za projektovanje, održavanje i nadzor gromobranske instalacije
- IEC-62305-4 *Electrical and electronic systems within structures*, razmatra zaštitu od indukovanih elektromagnetnih smetnji unutar objekta izloženog atmosferskom pražnjenju.

Standard IEC-62305 razmatra tri metoda konstruisanja gromobranske zaštite:

- Metod kotrljajuće sfere
- Metod zaštitnog ugla i
- Metod mreže provodnika

Iz praktičnih iskustava jedini metod za preporuku je metod kotrljajuće sfere koji uzima u obzir i geometriju štice objekta i struju atmosferskog pražnjenja.

Pošto ne postoje sistemi ni metodi koji bi omogućili potpunu zaštitu od atmosferskih pražnjenja, postoji potreba za procenom isplativosti postojanja gromobranske instalacije za zaštitu od atmosferskog pražnjenja. Drugi deo standarda IEC-62305 [1] procenjuje ekonomsku dobit postavljanjem gromobranske instalacije i prikazuje ekonomsku procenu najbolje realizovane gromobranske instalacije.

U delu standarda IEC-62305-2 predstavljen je metod procene rizika od atmosferskog pražnjenja. Pomenuti standard analizira postupak procene ukupnog rizika od atmosferskog pražnjenja i ispituje da li je rizik u granicama koje mogu da se tolerišu. Deo standarda odnosi se i na procenu rizika štete koju može da prouzrokuje atmosfersko pražnjenje u telekomunikacione i nadzemne vodove. Pošto se procena rizika standarda IEC 62305 ne odnosi konkretno na procenu rizika od atmosferskog pražnjenja u postrojenje, u disertaciji je prikazan, na standardu IEC-62305 zasnovan, modifikovan i prilagođen metod za procenu rizika od atmosferskog pražnjenja u postrojenje.

U literaturi [62] dat je osvrt na prednosti i nedostatke standarda IEC-62305. Jedna od najvećih zamerki je da ne bi trebalo uopšte da postoji tolerantni rizik od atmosferskog pražnjenja  $R_T$  (izraz 4.8).

U literaturi [63] prikazani su izrazi za proračun rizika od atmosferskog pražnjenja koji su znatno drugačiji u odnosu na izraze prikazane u standardu IEC-62305.

U ovom delu disertacije prikazani su algoritmi i metodologija za procenu rizika kvara postrojenja od atmosferskog pražnjenja. Primenom softverskih alata AutoCAD i softverskog jezika Visual Basic razvijen je originalni softverski alat "*Risk management and cost effective by IEC-62305*" koji omogućava brzu procenu rizika kvara i kvantitativnu analizu troškova usled nastalih šteta.

Rizik  $R$  se definiše kao vrednost verovatnog prosečnog godišnjeg gubitka [1]. Rizik je potrebno proceniti za svaku vrstu gubitka koji se može pojaviti u postrojenju.

Za zaštitu postrojenja od atmosferskog pražnjenja od značaja su dva tipa gubitaka L2 i L4, kojima su pridruženi odgovarajući rizici  $R_2$  i  $R_4$  [1]. Njihov opis je prikazan u tabeli 4.1. U tabeli 4.2 prikazani su izvori oštećenja, tipovi oštećenja i tipovi gubitaka.

Tabela 4.1: Opis rizika u zavisnosti od tipa gubitaka

<i>Tip gubitka</i>	<i>Opis gubitka</i>	<i>Rizik</i>	<i>Opis rizika</i>
L2	Gubitak od javnog značaja	$R_2$	Rizik od gubitaka javnog značaja
L4	Gubitak ekonomske prirode	$R_4$	Rizik od gubitaka ekonomske prirode

Oznake u tabeli 4.2 imaju sledeće značenje:

S1 – atmosfersko pražnjenje u objekat koji je povezan sa postrojenjem,

S3 – atmosfersko pražnjenje u postrojenje,

S4 – atmosfersko pražnjenje u neposrednu blizinu postrojenja,

D2 – fizičko oštećenje (vatra, eksplozija, mehaničko oštećenje...),

D3 – oštećenje opreme unutar postrojenja (rastavljači, prekidači, odvodnici prenapona, strujni i naponski transformatori...),

L2, L4 – tipovi gubitaka čiji opis je dat u tabeli 4.1.

Tabela 4.2: Načini obeležavanja izvora i tipova oštećenja i tipova gubitaka

<i>Mesto pražnjenja</i>	<i>Izvor oštećenja</i>	<i>Tip oštećenja</i>	<i>Tip gubitka</i>
Atmosfersko pražnjenje u objekat povezan sa postrojenjem	S1	D2 D3	L2, L4
Atmosfersko pražnjenje u postrojenje	S3	D2 D3	L2, L4
Atmosfersko pražnjenje u blizinu postrojenja	S4	D3	L2, L4

U nastavku su opisane komponente rizika od atmosferskog pražnjenja u postrojenje u odnosu na izvor i tip oštećenja.

#### 4.1 Komponente rizika u odnosu na izvor oštećenja

Rizik usled atmosferskog pražnjenja određuje se iz izraza:

$$R = R_D + R_I \quad (4.1)$$

Oznaka  $R_D$  predstavlja rizik usled direktnog atmosferskog pražnjenja u postrojenje (izvor oštećenja S3).

Rizik  $R_D$  određuje se iz izraza:

$$R_D = R_V + R_W \quad (4.2)$$

gde su:

$R_V$  – rizik od fizičkog oštećenja samog postrojenja usled direktnog atmosferskog pražnjenja u postrojenje

$R_W$  – rizik od oštećenja opreme unutar postrojenja usled direktnog atmosferskog pražnjenja u postrojenje.

Oznaka  $R_I$  predstavlja rizik usled atmosferskog pražnjenja ako se ono desi u blizini postrojenja (izvor oštećenja S1 i S4) i izračunava se iz izraza:

$$R_I = R_B + R_C + R_Z \quad (4.3)$$

Oznake u izrazu (4.3) imaju sledeće značenje:

$R_B$  – rizik od fizičkog oštećenja postrojenja usled atmosferskog pražnjenja u objekat u blizini postrojenja

$R_C$  – rizik od oštećenja opreme unutar postrojenja usled atmosferskog pražnjenja u objekat u blizini postrojenja

$R_Z$  – rizik da će atmosfersko pražnjenje u blizini postrojenja izazvati oštećenje opreme unutar postrojenja.

## 4.2 Komponente rizika u odnosu na tip oštećenja

Rizik usled atmosferskog pražnjenja u odnosu na tip oštećenja predstavlja se izrazom:

$$R = R_F + R_O \quad (4.4)$$

Oznaka  $R_F$  predstavlja rizik da će atmosfersko pražnjenje izazvati fizičko oštećenje (D2), za izvor oštećenja S1, S3 i S4.

Ovaj rizik određuje se iz izraza:

$$R_F = R_V + R_B \quad (4.5)$$

Oznaka  $R_O$  predstavlja rizik da će atmosfersko pražnjenje izazvati oštećenje opreme unutar postrojenja (D3), za izvor oštećenja S1, S3 i S4 i izračunava se iz izraza:

$$R_O = R_W + R_Z + R_C \quad (4.6)$$

Rizik od oštećenja  $R_x$  usled atmosferskog pražnjenja zavisi od godišnjeg broja opasnih događaja, što su u ovom slučaju atmosferska pražnjenja  $N_x$ , verovatnoće da će atmosfersko pražnjenje da izazove oštećenje  $P_x$  i posledice od oštećenja na godišnjem nivou  $L_x$ , a generalno se određuje primenom sledećeg izraza:

$$R_x = N_x \cdot P_x \cdot L_x \quad (4.7)$$

$N_x$  zavisi od površinske gustine atmosferskog pražnjenja  $N_g$  (broj atmosferskih pražnjenja po  $\text{km}^2$  na godišnjem nivou), fizičkih karakteristika objekta koji se štiti, njegovog okruženja i karakteristika tla.

Verovatnoća da će atmosfersko pražnjenje da izazove oštećenje  $P_x$  zavisi od karakteristika objekta koji se štiti i projektovane gromobranske zaštite, dok  $L_x$  zavisi od namene objekta koji se štiti, prisutnosti osoblja, da li je objekat od javnog značaja kao i od mera predviđenih za ograničenje od gubitaka usled atmosferskog pražnjenja.

Svaki pojedinačni i zbirni rizik treba da bude ispod granice tolerantnosti za rizik koji je predstavljen sledećim uslovom:

$$R_T \leq 10^{-5} \quad (4.8)$$

### 4.3 Zbirni pregled komponenti rizika

U tabeli 4.3 predstavljene su komponente rizika usled atmosferskog pražnjenja u postrojenje u zavisnosti od različitih tipova oštećenja prouzrokovanih različitim pogodnim lokacijama usled atmosferskog pražnjenja. Značenje parametara iz tabele 4.3 dato je u tabeli 4.4.

Tabela 4.3: Prikaz različitih tipova rizika u zavisnosti od tipa oštećenja i lokacije atmosferskog pražnjenja

$\begin{matrix} S \\ D \end{matrix}$	$S3$	$S4$	$S1$	$RD$
$D2$	$R_V = N_L \cdot P_V \cdot L_V$		$R_B = N_D \cdot P_B \cdot L_B$	$R_F = R_V + R_B$
$D3$	$R_W = N_L \cdot P_W \cdot L_W$	$R_Z = (N_I - N_L) \cdot P_Z \cdot L_Z$	$R_C = N_D \cdot P_C \cdot L_C$	$R_O = R_Z + R_W + R_C$
$RS$	$R_D = R_V + R_W$	$R_I = R_Z + R_B + R_C$		

Tabela 4.4: Značenje parametara iz Tabele 4.3

Simbol	Značenje
Srednja vrednost broja atmosferskih pražnjenja na godišnjem nivou	
$N_D$	u objekat koji je povezan sa postrojenjem
$N_L$	u postrojenje
$N_I$	u blizini postrojenja
Verovatnoća da će atmosfersko pražnjenje u objekat povezan sa postrojenjem izazvati	
$P_B$	fizičko oštećenje samog postrojenja
$P_C$	oštećenje opreme unutar postrojenja
Verovatnoća da će atmosfersko pražnjenje u postrojenje izazvati	
$P_V$	fizičko oštećenje samog postrojenja
$P_W$	oštećenje opreme unutar postrojenja
Verovatnoća da će atmosfersko pražnjenje u blizini postrojenja izazvati	
$P_Z$	oštećenje opreme unutar postrojenja
Gubitak zbog	
$L_B=L_V=L_f$	fizičkog oštećenja postrojenja
$L_C=L_W=L_Z=L_0$	oštećenja opreme unutar postrojenja

Oznake u tabeli 4.3 imaju sledeće značenje:

S – Izvor oštećenja

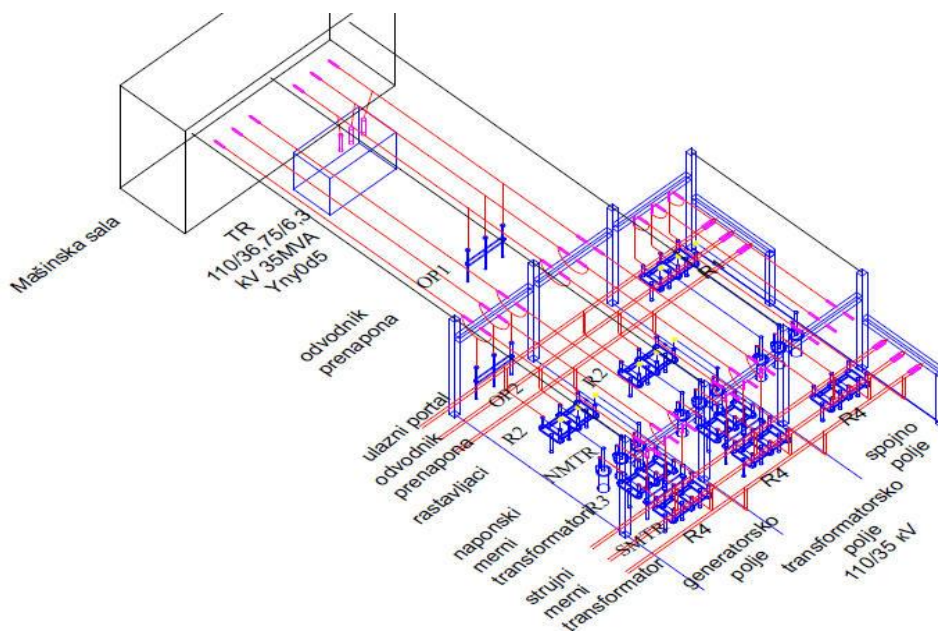
D – Tip oštećenja

RS – Ukupan rizik sa aspekta izvora oštećenja

RD – Ukupan rizik sa aspekta tipa oštećenja

Na slici 4.1 je prikazan primer uopštenog postrojenja radi pojašnjenja pojmova izvora oštećenja S1, S3 i S4. Zbog činjenice da se deo standarda IEC 62305-2 ne odnosi eksplicitno na proračun rizika kvara usled atmosferskog pražnjenja u postrojenje, potrebno je standard prilagoditi ovoj problematici. Na slici 4.1 su prikazani svi elementi postrojenja koji su od značaja za proračun rizika. Zbog bolje preglednosti visokonaponskih elemenata u prilogu na slici 10.1 je prikazana slika 4.1 u većoj razmeri.

Pod pojmom postrojenje pri analizi rizika kvara se podrazumevaju sledeći visokonaponski elementi: odvodnik prenapona (OP2), rastavljači (R1, R2, R3 i R4), naponski merni transformator (NMTR), strujni merni transformator (SMTR) zajedno sa faznim provodnicima, sabirnicama (linije označene crvenom bojom) i zaštitnim užadima (linije označene crnom bojom). Pod pojmom objekat povezan sa postrojenjem (tabela 4.4) podrazumeva se da mašinska sala (slika 4.1). Granica razdvajanja postrojenja i objekta povezanog sa postrojenjem su portalni stubovi (stubovi na ulazu u postrojenje na koje dolaze fazni provodnici sa mašinske sale).



Slika 4.1: Primer postrojenja



Srednja vrednost broja atmosferskih pražnjenja na godišnjem nivou u objekat koji je povezan sa postrojenjem proračunava se prema sledećem izrazu:

$$N_D = N_g \cdot A_d \cdot C_d \cdot 10^{-6} \quad (4.9)$$

gde su:

$N_g$  – gustina atmosferskog pražnjenja na godišnjem nivou (broj udara/km<sup>2</sup>/god)

$A_d$  – prihvatna površina postrojenja u [m<sup>2</sup>]

$C_d$  – faktor koji zavisi od okoline postrojenja (prikazan u tabeli 4.5).

Parametar  $N_g$  određuje se iz izraza, a prema [1]:

$$N_g \approx 0,1 \cdot T_d \quad (4.10)$$

gde je  $T_d$  – broj grmljavinskih dana na godišnjem nivou koji se određuje iz izokerauničke karte određenog regiona. Izraz (4.10) daje iste rezultate kao primenom izraza prema literaturi [17] (tabela 2.1).

Preporučeni izraz za proračun gustine atmosferskih pražnjenja na godišnjem nivou u Republici Srbiji, a prema [64] je:

$$N_g = 0,04 \cdot T_d^{1,25} \quad (4.11)$$

Upoređivanjem (4.10) i (4.11) može se zaključiti da ovi izrazi daju približno iste rezultate za isti broj grmljavinskih dana na godišnjem nivou  $T_d$ .

Tabela 4.5: Zavisnost faktora  $C_d$  od okoline

<i>Lokacija</i>	$C_d$
Postrojenje okruženo visokim objektima i drvećem	0,25
Postrojenje okruženo objektima ili drvećem iste visine ili nižim	0,5
Nema drugih objekata u blizini	1
Postrojenje u brdima	2

Srednja vrednost broja atmosferskih pražnjenja na godišnjem nivou u postrojenje proračunava se prema sledećem izrazu:

$$N_L = N_g \cdot A_l \cdot C_d \cdot C_t \cdot 10^{-6} \quad (4.12)$$

gde su:

$A_l$  – prihvatna površina postrojenja u [m<sup>2</sup>]

$C_t$  – korekcionni faktor koji se odnosi na broj transformatora između tačke atmosferskog pražnjenja i postrojenja (tabela 4.6).

Tabela 4.6: Prikaz faktora  $C_t$ 

<b><i>Transformatori</i></b>	<b><math>C_t</math></b>
Postojanje blok transformatora u sklopu postrojenja	0,2
Bez blok transformatora u sklopu postrojenja	1

Srednja vrednost broja atmosferskih pražnjenja na godišnjem nivou u blizini postrojenja proračunava se prema sledećem izrazu:

$$N_I = N_g \cdot A_i \cdot C_e \cdot C_t \cdot 10^{-6} \quad (4.13)$$

gde su:

$A_i$  – prihvatna površina postrojenja [ $m^2$ ]

$C_e$  – korekcionni faktor okoline predstavljen u Tabeli 4.7.

Tabela 4.7: Faktor  $C_e$  u zavisnosti od okoline

<b><i>Okolina</i></b>	<b><math>C_e</math></b>
Gradska okolina sa zgradama visine preko 20 m	0
Gradska okolina sa zgradama visine između 10 m i 20 m	0,1
Prigradska okolina sa zgradama nižim od 10 m	0,5
Seoska okolina	1

Verovatnoća  $P_B$  da će atmosfersko pražnjenje u objekat u blizini postrojenja izazvati oštećenje samog objekta prikazana je u zavisnosti od nivoa zaštite (tabela 4.8).

Tabela 4.8: Verovatnoća  $P_B$  u zavisnosti od nivoa zaštite

<b><i>Karakteristika objekta</i></b>	<b><i>Nivo zaštite</i></b>	<b><math>P_B</math></b>
Objekat bez gromobranske zaštite		1
Objekat sa gromobranskom zaštitom	IV	0,2
	III	0,1
	II	0,05
	I	0,02

Verovatnoće  $P_C$ ,  $P_V$ ,  $P_W$ ,  $P_Z$  da će atmosfersko pražnjenje u objekat u blizini postrojenja da izazove oštećenje na opremi u postrojenju prikazane su u tabeli 4.9 u zavisnosti od nivoa zaštite.

Tabela 4.9: Verovatnoće  $P_C, P_V, P_W, P_Z$  u zavisnosti od nivoa zaštite

<i>Nivo zaštite</i>	<i><math>P_C, P_V, P_W, P_Z</math></i>
Objekat bez prenaponske zaštite	1
III-IV	0,03
II	0,02
I	0,01

Gubitak zbog fizičkog oštećenja postrojenja koji može da se toleriše je:

$$L_B = L_V = r_p \cdot r_f \cdot L_f \quad (4.14)$$

gde su:  $L_f$  – gubitak usled fizičkog oštećenja postrojenja koji se određuje iz izraza:

$$L_f = \frac{n_p}{n_t} \cdot \frac{t_p}{8760} \quad (4.15)$$

pri čemu su:

$n_p$  – broj mogućih žrtava koje su u opasnosti ako dođe do atmosferskog pražnjenja u postrojenje,

$n_t$  – ukupan broj prisutnih osoba u postrojenju,

$t_p$  – broj sati na godišnjem nivou kada su u postrojenju prisutne osobe. Prema

[1] može se usvojiti  $L_f = 0,33$  za postrojenje.

Faktori  $r_p$  i  $r_f$  prikazani su u tabelama 4.10 i 4.11 respektivno.

Tabela 4.10: Korekcionni faktor  $r_p$  u funkciji mera za smanjenje posledica požara

<i>Mere za smanjenje posledica požara</i>	<i><math>r_p</math></i>
Ne postoje preduzete mere	1
Postojanje jedne od sledećih mera: aparat za gašenje požara, ručno podešavanje instalacija za gašenje požara, ručno pokretanje alarma za gašenje požara, hidranti, zaštićeni putevi evakuacije	0,5
Postojanje jedne od sledećih mera: automatski podešena instalacija za gašenje požara, automatsko pokretanje alarma za gašenje požara	0,2

Tabela 4.11: Korekcionni faktor  $r_f$  u funkciji rizika od požara

<b>Rizik od požara</b>	<b><math>r_f</math></b>
Eksplozija	1
Visok	$10^{-1}$
Srednji	$10^{-2}$
Nizak	$10^{-3}$
Nema	0

Gubitak usled oštećenja opreme unutar postrojenja usvaja se da iznosi [1]:

$$L_C = L_W = L_Z = 10^{-3} \quad (4.16)$$

U Tabeli 4.12 prikazane su maksimalne vrednosti parametara atmosferskog pražnjenja u zavisnosti od nivoa zaštite.

Tabela 4.12: Maksimalne vrednosti parametara atmosferskog pražnjenja u zavisnosti od nivoa zaštite

<b>Parametri atmosferskog pražnjenja</b>			<b>Nivo zaštite</b>			
Parametar	Oznaka	Jedinica	I	II	III	IV
Amplituda struje atmosferskog pražnjenja	I	kA	200	150	100	
Količina naelektrisanja	Q	C	100	75	50	
Specifična energija	W/R	MJ/ $\Omega$	10	5,6	2,5	
Vremenski parametri	T <sub>1</sub> /T <sub>2</sub>	$\mu$ s/ $\mu$ s	10/350			

U tabeli 4.13 prikazane su minimalne vrednosti parametara atmosferskog pražnjenja u zavisnosti od nivoa zaštite i poluprečnika kotrljajuće sfere.

Tabela 4.13: Minimalne vrednosti parametara atmosferskog pražnjenja u zavisnosti od nivoa zaštite

<b>Parametri atmosferskog pražnjenja</b>			<b>Nivo zaštite</b>			
	Oznaka	Jedinica	I	II	III	IV
Minimalna vrednost struje atmosferskog pražnjenja	I	kA	3	5	10	16
Poluprečnik kotrljajuće sfere	r	m	20	30	45	60

U tabeli 4.14 predstavljene su verovatnoće da će struje atmosferskih pražnjenja biti manje od vrednosti koje su prikazane u tabeli 4.12 i veće od vrednosti koje su prikazane u tabeli 4.13.

Tabela 4.14: Verovatnoće da su parametri atmosferskog pražnjenja u granicama datim u tabelama 4.12 i 4.13

<i>Verovatnoća da će parametri atmosferskog pražnjenja biti:</i>	<i>Nivo zaštite</i>			
	I	II	III	IV
Manji od vrednosti koje su prikazane u tabeli 4.12	0,99	0,98	0,97	0,97
Veći od vrednosti koje su prikazane u tabeli 4.13	0,99	0,97	0,91	0,84

U tabeli 4.15 prikazane su dozvoljene vrednosti rizika  $R_T$  u zavisnosti od tipova gubitaka.

Tabela 4.15: Dozvoljene vrednosti rizika  $R_T$  u zavisnosti od tipova gubitaka

<i>Tipovi gubitaka</i>	$R_T$
Gubitak ljudskog života ili povrede	$10^{-5}$
Gubitak od javnog značaja	$10^{-3}$

Da bi gromobrnska instalacija bila efikasna sa stanovišta dozvoljenog rizika, mora biti ispunjen uslov dat izrazom 4.8.

#### 4.4 Procena šteta nastalih usled atmosferskog pražnjenja u postrojenju

Atmosfersko pražnjenje u postrojenje može izazvati velike štete u slučaju neodgovarajuće gromobrnske zaštite. Iz tog razloga procena šteta nastalih usled mogućih atmosferskih pražnjenja u postrojenje je od velike važnosti.

Prema [1] štete prouzrokovane atmosferskim pražnjenjem u postrojenje ( $C_{RL}$ ) i ( $C_L$ ) određuju se iz sledećih izraza:

$$C_{RL} = (R_B + R_V) \cdot (C_B + C_S + C_C) + (R_C + R_W + R_Z) \cdot C_S \quad (4.17)$$

$$C_L = (R_B' + R_V') \cdot (C_B + C_S + C_C) + (R_C' + R_W' + R_Z') \cdot C_S \quad (4.18)$$

gde su:

$C_{RL}$  (NJ) – trošak usled totalne štete prouzrokovane atmosferskim pražnjenjem u postrojenje, uprkos merama zaštite, NJ – novčane jedinice,

$C_L$  (NJ) – trošak usled totalne štete prouzrokovane atmosferskim pražnjenjem u postrojenje bez mera zaštite,

$R_V, R_B, R_W, R_Z, R_C$ , – odgovarajući rizici, predstavljeni u tabeli 4.3, uprkos merama zaštite,

$R_V', R_B', R_W', R_Z', R_C'$ , – odgovarajući rizici, predstavljeni u tabeli 4.3, bez mera zaštite,

$C_S$  (NJ) – nabavna vrednost visokonaponskih elemenata unutar objekta (blok transformatori, rastavljači, prekidači, strujni i naponski transformatori fazni provodnici, sabirnice...),

$C_B$  (NJ) – nabavna vrednost objekta (stubovi, zidovi, pomoćne prostorije...),

$C_C$  (NJ) – nabavna vrednost ostalog sadržaja unutar objekta.

Ukupni troškovi se sastoje od investicionih troškova, odnosno troškova prilikom instaliranja gromobranske instalacije, i eksploatacionih troškova, koji se odnose na održavanje gromobranske instalacije. Godišnja interesna (kamatna) stopa  $i$  omogućava poređenje troškova koji se javljaju u različitim vremenskim periodima. Kamatna stopa  $i$  predstavlja procenat uvećanja uložених novčanih sredstava na kraju svake godine da kojim slučajem nisu uložena u gromobransku instalaciju.

Ukupni godišnji troškovi obuhvataju i troškove amortizacije. Uprošćeno, stopa amortizacije predstavlja recipročnu vrednost veka trajanja elementa. Godišnji troškovi amortizacije mogu se definisati i kao troškovi koji bi, ako bi se izdvajali svake godine, davali na kraju perioda eksploatacije vrednost jednaku ukupnim investicionim troškovima. Godišnja stopa održavanja predstavlja novčana sredstva na godišnjem nivou koja se izdvajaju radi održavanja gromobranske instalacije u ispravnoj funkciji.

Ukupni godišnji troškovi gromobranske instalacije određuju se iz izraza:

$$C_{PM} = C_P \cdot (i + a + m) \quad (4.19)$$

gde su:  $C_P$  (NJ) – nabavna vrednost gromobranskih elemenata,  $i$  – godišnja kamatna stopa,  $a$  – godišnja stopa amortizacije,  $m$  – godišnja stopa održavanja.

Pretpostavljene vrednosti za kamatnu stopu, stopu amortizacije i stopu održavanja prikazane su u tabeli 4.16 [1].

Tabela 4.16: Pretpostavljene vrednosti za kamatnu stopu, stopu amortizacije i stopu održavanja gromobranske instalacije

<i>Stopa</i>	<i>Simbol</i>	<i>Vrednost</i>
kamatna	<i>i</i>	0,04
amortizacije	<i>a</i>	0,05
održavanja	<i>m</i>	0,01

Ušteda novca  $S$  na godišnjem nivou upotrebom gromobranske instalacije postrojenja može se proceniti primenom sledećeg izraza:

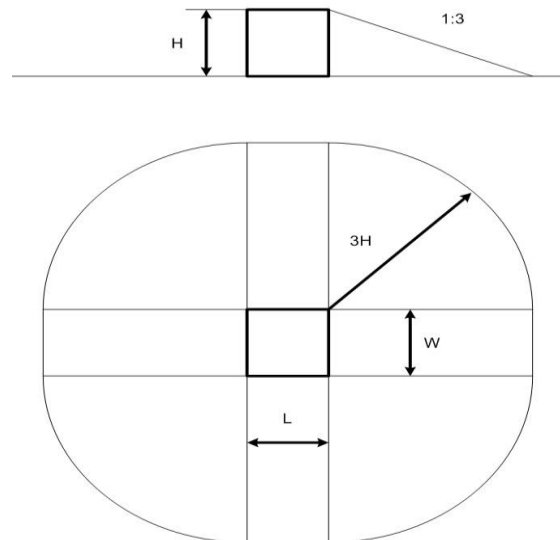
$$S = C_L - (C_{PM} + C_{RL}) \quad (4.20)$$

Gromobranska instalacija je odgovarajuća sa ekonomskog stanovišta ako je ispunjen uslov  $S > 0$ .

Prihvatna površina objekta na kome treba realizovati gromobransku instalaciju predstavlja površinu tla koja ima istu učestanost direktnih pražnjenja kao i objekat koji se štiti. Prihvatna površina  $A$  za postrojenja prikazana je na slici 4.2 i određuje se iz izraza:

$$A = L \cdot W + 6 \cdot H \cdot (L + W) + 9 \cdot \pi \cdot (H)^2 \quad (4.21)$$

gde su:  $L$  – dužina postrojenja,  $W$  – širina postrojenja,  $H$  – visina postrojenja.



Slika 4.2: Prihvatna površina postrojenja

#### **4.5 Primena fuzzy logike pri određivanju rizika kvara od atmosferskog pražnjenja kod postrojenja**

Teorija fuzzy skupova ili tzv. "rasplnutih" skupova predstavlja pogodan matematički model za tretiranje neizvesnosti, višeznačnosti i neodređenosti. Aproksimativno ili fuzzy rezonovanje je kombinovanje skupa logičkih pravila u jedinstvenu strategiju upravljanja [65]. Širok spektar problema se može rešavati primenom fuzzy teorije.

Osnovne faze u projektovanju fuzzy sistema su:

- Identifikacija problema
- Definisane ulaznih i izlaznih promenljivih
- Fazifikacija
- Definisane baze fuzzy pravila
- Razvijanje algoritma aproksimativnog rezonovanja
- Defazifikacija

##### ***Identifikacija problema***

Fuzzy logika se najčešće koristi za modelovanje složenih sistema i procesa, u kojima je primenom drugih metoda veoma teško utvrditi međuzavisnost između pojedinih promenljivih, kao što je i slučaj u disertaciji, gde se povezuje rizik od direktnog atmosferskog pražnjenja sa ostvarenom zonom zaštite.

##### ***Definisane ulaznih i izlaznih promenljivih***

Ulazne promenljive u fuzzy sistemima su lingvističke promenljive. Lingvističkom promenljivom smatra se promenljiva čije su numeričke vrednosti fuzzy brojevi ili promenljiva čiju oblast definisanosti čine lingvističke vrednosti ili izrazi. Lingvističke vrednosti se predstavljaju fuzzy skupovima. Izlazna promenljiva se dobija u kontinualnoj formi, odnosno svim mogućim vrednostima izlazne promenljive pridružen je odgovarajući stepen pripadnosti. Postupkom defazifikacije dobija se jedna vrednost izlazne promenljive.



### ***Fazifikacija***

Fazifikacija je postupak preslikavanja vektora ulaznih veličina u odgovarajuće fuzzy skupove. Svaka ulazna promenljiva sa svojim lingvističkim vrednostima opisuje se odgovarajućim fuzzy skupom. Oblik fuzzy skupova zavisi od identifikacije oblasti definisanja i izbora funkcija pripadnosti. Identifikacija je postupak određivanja intervala u kojima se nalaze sve vrednosti ulaznih promenljivih. Pod diskretizacijom se podrazumeva podela intervala na podintervale u okviru kojih se definišu funkcije pripadnosti. Od velikog značaja je i izbor oblika funkcije pripadnosti fuzzy skupa. Oblik funkcije pripadnosti može biti trouglasti, trapezoidni, Gausova kriva, Belova kriva, itd. U daljem radu korišćeni su trouglasti oblici funkcija pripadnosti fuzzy skupova [65]. U literaturi [66, 67] su prikazane najčešće korišćeni fuzzy skupovi u opisu funkcionisanja elektroenergetskog sistema. To su pre svega trouglasti oblici fuzzy funkcije. U disertaciji su na osnovu njih ustanovljena fuzzy pravila. Identifikacija i diskretizacija oblasti definisanosti i određivanje parametara funkcija pripadnosti fuzzy skupova je potpuno subjektivno. Zbog te činjenice funkcije pripadnosti fuzzy skupova kojima se opisuje isti pojam, predložene od različitih autora, mogu biti veoma različite.

### ***Definisanje baze fuzzy pravila***

Fuzzy pravila predstavljaju pogodan način za opisivanje iskustvenih pravila koja se konkretno tiču atmosferskog pražnjenja u postrojenja. Skup svih definisanih fuzzy pravila je baza fuzzy pravila. Fuzzy pravila su oblika "Ako-Tada" ("*If-Then*").

U ovoj disertaciji fuzzy pravila su formirana na osnovu saznanja o atmosferskim pražnjenjima u postrojenje. Postupak formiranja fuzzy pravila se realizuje kroz više iteracija. Prvi korak je definisanje skupa pravila. Posle analize dobijenih rezultata, ako je potrebno, vrši se korekcija pravila i ponovno testiranje modela.

### ***Razvijanje algoritma aproksimativnog rezonovanja***

Algoritam aproksimativnog rezonovanja je skup fuzzy pravila. Fuzzy pravilo je fuzzy implikacija u obliku:

Ako  $x$  je A tada  $y$  je B

gde su A i B lingvističke promenljive opisane fuzzy skupovima definisanim na prostorima X i Y. Funkcije pripadnosti ovih fuzzy skupova su  $\mu_A(x)$  i  $\mu_B(y)$ . Prvi deo pravila " $x$  je A" je uslov, a drugu deo pravila " $y$  je B" je posledica ili zaključak. Fuzzy

pravilo opisuje fuzzy relaciju između promenljivih  $x$  i  $y$ . Svakom elementu  $(x, y)$  fuzzy relacija pridružuje stepen pripadnosti  $\mu(x, y)$ . Fuzzy rezonovanje (aproksimativno rezonovanje) je procedura zaključivanja kada su pretpostavke opisane fuzzy skupovima.

### ***Defazifikacija***

Algoritmom aproksimativnog rezonovanja se kao izlazni rezultat dobija rezultujući fuzzy skup u kome sve moguće vrednosti izlazne promenljive imaju određeni stepen pripadnosti. Procesom defazifikacije dobija se numerička vrednost izlazne promenljive koja je u disertaciji označena sa  $R_D$ . Neke od metoda defazifikacije su: najmanja vrednost sa maksimalnim stepenom pripadnosti, najveća vrednost sa maksimalnim stepenom pripadnosti, srednja vrednost sa maksimalnim stepenom pripadnosti i centar gravitacije. Izabrani metod defazifikacije primenjen u disertaciji je metod najveće vrednosti koja ima maksimalni stepen pripadnosti rezultujućem fuzzy skupu.

U nastavku je analiziran konkretan fuzzy sistem formiran za potrebe rizika i zone zaštite usled direktnog atmosferskog pražnjenja u postrojenju.

### ***Identifikacija problema***

Zbog nepostojanja matematičkog izraza koji bi povezao rizik od direktnog atmosferskog pražnjenja i ostvarene zone zaštite gromobranske instalacije u disertaciji su pomenute neodređenosti i rasplinitosti analizirane fuzzy pristupom kao metodom veštačke inteligencije. U radu [68] je opisan postupak korišćenja fuzzy logike pri proračunima rizika od atmosferskog pražnjenja usled indukovanih prenapona, dok još nije publikovan standard IEC 62305. U ovom radu posmatrani su fuzzy skupovi koji opisuju opasne događaje usled pojave indukovanih prenapona kao što su: oštećenje izolacije opreme, opasnost po ljudsko zdravlje ili život (npr. defibrilacija srca) i požar. Posmatrani objekti u radu [68] su objekti od opšteg značaja u koje ne spadaju postrojenja.

### ***Definisanje ulazne i izlazne promenljive***

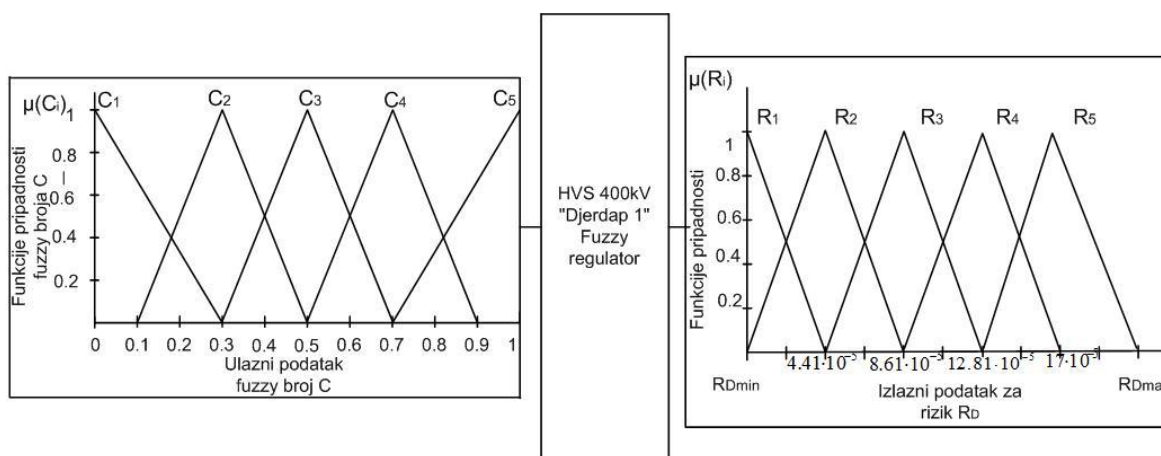
Moguće je vršiti detaljniju procenu rizika kvara od atmosferskog pražnjenja za izvor oštećenja koji karakteriše direktno atmosfersko pražnjenje u samo postrojenje ( $R_D$ ), tako što se rizik  $R_D$  predstavlja kao fuzzy skup prema izrazu [65]:

$$R_D = C \cdot (R_V + R_W) \quad (4.20)$$

gde je  $C$  fuzzy skup koji opisuje meru izvedenog prihvatnog sistema gromobranske instalacije postrojenja. Softverski alat "*Fuzzy Logic Toolbox – Matlab*" je alat za rešavanje problema koji su opisani fuzzy brojevima. "*Fuzzy Logic Toolbox – Matlab*" omogućava analizu složenih sistema ponašanja korišćenjem jednostavnih logičkih zaključaka, a zatim i implementaciju zaključaka [69]. Fuzzy skup  $C$  predstavlja ulaznu promenljivu u fuzzy regulator koji je prikazan u okviru fuzzy kontrolera u softverskom alatu "*Fuzzy Logic Toolbox – Matlab*" sa odgovarajućim funkcijama pripadnosti (slika 4.3). Izlazna promenljiva je rizik  $R_D$  predstavljen kao fuzzy skup sa odgovarajućim funkcijama pripadnosti koji posle procesa defazifikacije biva predstavljen analitičkim brojevima. Tako dobijena vrednost za rizik od direktnog atmosferskog pražnjenja  $R_D$  je uporediva sa tolerantnom vrednošću (izraz 4.8).

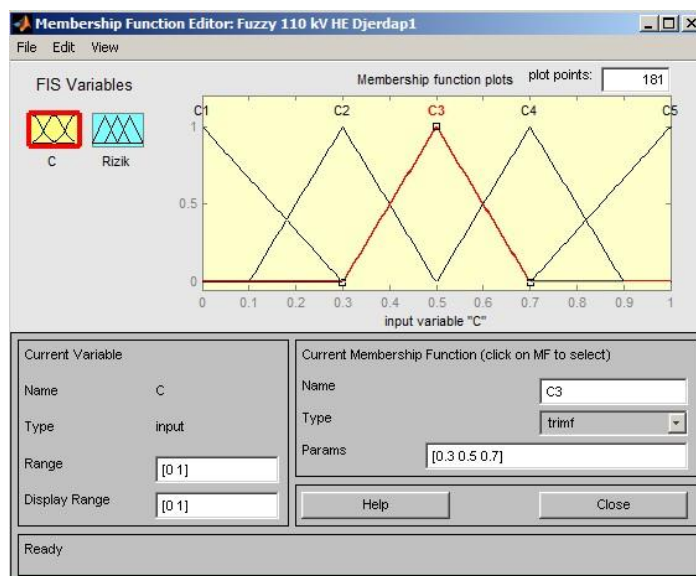
### Fazifikacija

Na slici 4.3 je prikazan postupak fazifikacije ulazne i izlazne promenljive  $C$  i  $R_D$ .



Slika 4.3: Funkcije pripadnosti  $C$  i  $R_D$

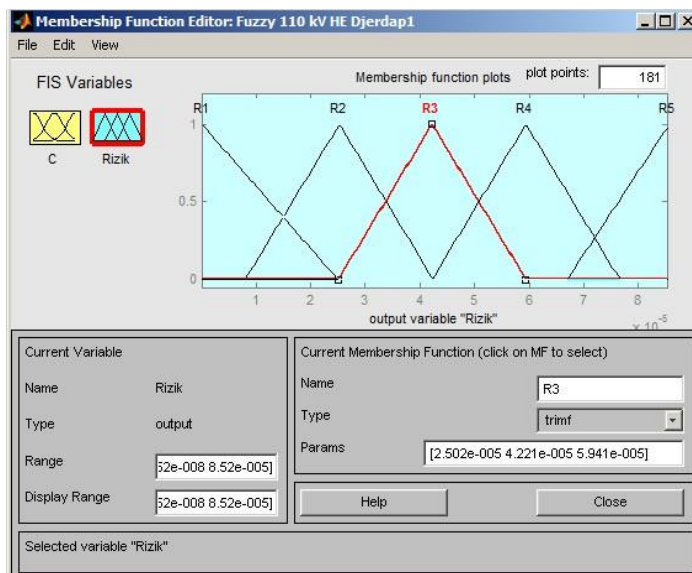
Na slikama 4.4 i 4.5 su zadate funkcije pripadnosti za brojeve  $C$  i  $R_D$  u prikazanom okruženju "*Fuzzy Logic Toolbox – Matlab-a*".



Slika 4.4: Funkcije pripadnosti fuzzy broja  $C$

### Definisanje baze fuzzy pravila

Na osnovu proračunatih vrednosti rizika od atmosferskog pražnjenja pomoću razvijenog, originalnog softverskog alata "*Risk management and cost effective by IEC-62305*", koji je detaljno opisan u poglavlju 6, moguće je definisati pravila fuzzy skupova  $C$  i  $R_D$  [70, 71]:



Slika 4.5: Funkcije pripadnosti fuzzy broja  $R_D$

$C_1$  – Veoma dobro izvedena gromobranska instalacija, što znači da je 80-100% objekta u zoni zaštite.  $R_1$  – Vrednost rizika od direktnog atmosferskog pražnjenja u postrojenje je veoma mala.

$C_2$  – Dobro izvedena gromobranska instalacija, što znači da je 60-80% objekta u zoni zaštite.  $R_2$  – Vrednost rizika od direktnog atmosferskog pražnjenja u postrojenje je mala.

$C_3$  – Srednje dobro izvedena gromobranska instalacija što znači da je 40-60% objekta u zoni zaštite.  $R_3$  – Vrednost rizika od direktnog atmosferskog pražnjenja u postrojenje je srednja.

$C_4$  – Slabo izvedena gromobranska instalacija što znači da je 20-40% objekta u zoni zaštite.  $R_4$  – Vrednost rizika od direktnog atmosferskog pražnjenja u postrojenje je velika.

$C_5$  – Veoma slabo izvedena gromobranska instalacija što znači da je 0-20% objekta u zoni zaštite.  $R_5$  – Vrednost rizika od direktnog atmosferskog pražnjenja u postrojenje je veoma velika.

### ***Razvijanje algoritma aproksimativnog rezonovanja***

U tabeli 4.17 je prikazana procedura zaključivanja nakon definisanja prethodnih koraka analize fuzzy sistema. Analitički izrazi funkcija pripadnosti  $C$  i  $R_D$  dati su u tabeli 4.17, za prethodno definisan opseg rizika koji se dobija korišćenjem razvijenog softverskog alata "*Risk management and cost effective by IEC-62305*" (opisan u poglavlju 6) i funkcije pripadnosti za konkretno postrojenje.

Algoritam aproksimativnog rezonovanja za procenu rizika od atmosferskog pražnjenja je razvijen i primenjen na određivanje rizika kvara kod postrojenja i sastoji se od 5 pravila [65, 71]:

*Pravilo 1:* Ako je veoma dobro izvedena gromobranska instalacija, što znači da je 80-100% objekta u zoni zaštite, tada je vrednost rizika od direktnog atmosferskog pražnjenja za izvor oštećenja koji karakteriše atmosfersko pražnjenje u samo postrojenje ( $R_D$ ), veoma mala.

*Pravilo 2:* Ako je dobro izvedena gromobranska instalacija, što znači da je 60-80% objekta u zoni zaštite, tada je vrednost rizika od direktnog atmosferskog pražnjenja za izvor oštećenja koji karakteriše atmosfersko pražnjenje u samo postrojenje ( $R_D$ ), mala.

Tabela 4.17. Analitički oblici fuzzy skupova  $C$  i  $R_D$  [65, 66]

$\mu_j(C_i)_{j=1,\dots,5}$	$\mu_j(R_i)_{j=1,\dots,5}$
$\mu_1(C_i) = \left\{ \begin{array}{l} 1 \Rightarrow C_i \leq 0 \\ \frac{0,3 - C_i}{0,3} \Rightarrow 0 < C_i \leq 0,3 \\ 0 \Rightarrow C_i > 0,3 \end{array} \right\}$	$\mu_1(R_i) = \left\{ \begin{array}{l} 0 \Rightarrow R_i < 8,51 \cdot 10^{-7} \\ \frac{2,553 \cdot 10^{-5} - R_i}{2,4679 \cdot 10^{-5}} \Rightarrow 8,51 \cdot 10^{-7} < R_i \leq 2,553 \cdot 10^{-5} \\ 0 \Rightarrow R_i > 2,553 \cdot 10^{-5} \end{array} \right\}$
$\mu_2(C_i) = \left\{ \begin{array}{l} 0 \Rightarrow 0 \leq C_i \leq 0,1 \\ \frac{C_i - 0,1}{0,2} \Rightarrow 0,1 < C_i \leq 0,3 \\ \frac{0,5 - C_i}{0,2} \Rightarrow 0,3 < C_i \leq 0,5 \\ 0 \Rightarrow C_i > 0,5 \end{array} \right\}$	$\mu_2(R_i) = \left\{ \begin{array}{l} 0 \Rightarrow 0 \leq R_i < 8,51 \cdot 10^{-6} \\ \frac{R_i - 8,51 \cdot 10^{-6}}{1,702 \cdot 10^{-5}} \Rightarrow 8,51 \cdot 10^{-6} \leq R_i \leq 2,553 \cdot 10^{-5} \\ \frac{4,255 \cdot 10^{-5} - R_i}{1,702 \cdot 10^{-5}} \Rightarrow 2,553 \cdot 10^{-5} < R_i \leq 4,255 \cdot 10^{-5} \\ 0 \Rightarrow R_i > 4,255 \cdot 10^{-5} \end{array} \right\}$
$\mu_3(C_i) = \left\{ \begin{array}{l} 0 \Rightarrow 0 \leq C_i \leq 0,3 \\ \frac{C_i - 0,3}{0,2} \Rightarrow 0,3 < C_i \leq 0,5 \\ \frac{0,7 - C_i}{0,2} \Rightarrow 0,5 < C_i \leq 0,7 \\ 0 \Rightarrow C_i > 0,7 \end{array} \right\}$	$\mu_3(R_i) = \left\{ \begin{array}{l} 0 \Rightarrow 0 \leq R_i < 2,553 \cdot 10^{-5} \\ \frac{R_i - 2,553 \cdot 10^{-5}}{1,702 \cdot 10^{-5}} \Rightarrow 2,553 \cdot 10^{-6} \leq R_i \leq 4,225 \cdot 10^{-5} \\ \frac{5,957 \cdot 10^{-5} - R_i}{1,702 \cdot 10^{-5}} \Rightarrow 4,225 \cdot 10^{-5} < R_i \leq 5,957 \cdot 10^{-5} \\ 0 \Rightarrow R_i > 5,957 \cdot 10^{-5} \end{array} \right\}$
$\mu_4(C_i) = \left\{ \begin{array}{l} 0 \Rightarrow 0 \leq C_i \leq 0,5 \\ \frac{C_i - 0,5}{0,2} \Rightarrow 0,5 < C_i < 0,7 \\ \frac{0,9 - C_i}{0,2} \Rightarrow 0,7 < C_i \leq 0,9 \\ 0 \Rightarrow C_i > 0,9 \end{array} \right\}$	$\mu_4(R_i) = \left\{ \begin{array}{l} 0 \Rightarrow 0 \leq R_i < 0,5 \cdot 10^{-6} \\ \frac{R_i - 4,255 \cdot 10^{-5}}{1,702 \cdot 10^{-5}} \Rightarrow 4,255 \cdot 10^{-5} \leq R_i \leq 5,957 \cdot 10^{-5} \\ \frac{7,659 \cdot 10^{-5} - R_i}{1,702 \cdot 10^{-5}} \Rightarrow 5,957 \cdot 10^{-5} < R_i \leq 7,659 \cdot 10^{-5} \\ 0 \Rightarrow R_i > 7,659 \cdot 10^{-5} \end{array} \right\}$
$\mu_5(C_i) = \left\{ \begin{array}{l} 0 \Rightarrow 0 \leq C_i \leq 0,7 \\ \frac{C_i - 0,7}{0,3} \Rightarrow 0,7 < C_i \leq 1 \\ 1 \Rightarrow 1 < C_i \end{array} \right\}$	$\mu_5(R_i) = \left\{ \begin{array}{l} 0 \Rightarrow 0 \leq R_i < 5,957 \cdot 10^{-5} \\ \frac{R_i - 5,957 \cdot 10^{-5}}{1,702 \cdot 10^{-5}} \Rightarrow 5,957 \cdot 10^{-5} \leq R_i \leq 8,51 \cdot 10^{-5} \\ 0 \Rightarrow R_i > 8,51 \cdot 10^{-5} \end{array} \right\}$

*Pravilo 3:* Ako je srednje izvedena gromobranska instalacija, što znači da je 40-60% objekta u zoni zaštite, tada je vrednost rizika od direktnog atmosferskog pražnjenja

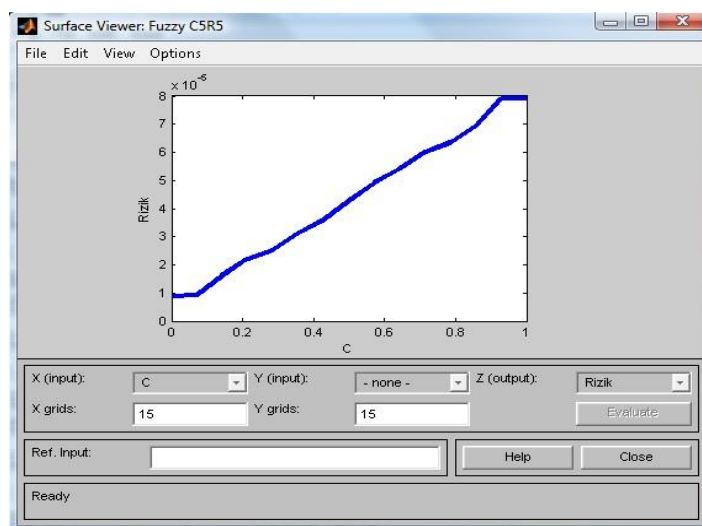
za izvor oštećenja koji karakteriše atmosfersko pražnjenje u samo postrojenje ( $R_D$ ), srednja.

*Pravilo 4:* Ako je slabo izvedena gromobranska instalacija, što znači da je 20-40% objekta u zoni zaštite, tada je vrednost rizika od direktnog atmosferskog pražnjenja za izvor oštećenja koji karakteriše atmosfersko pražnjenje u samo postrojenje ( $R_D$ ), velika.

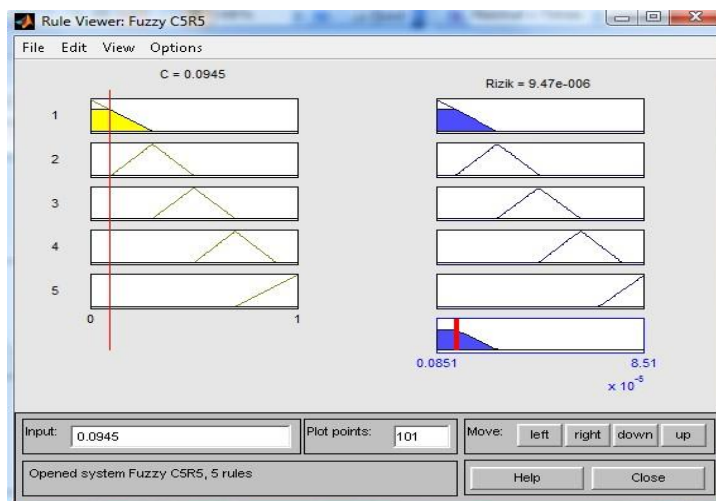
*Pravilo 5:* Ako je veoma slabo izvedena gromobranska instalacija, što znači da je 0-20% objekta u zoni zaštite, tada je vrednost rizika od direktnog atmosferskog pražnjenja za izvor oštećenja koji karakteriše atmosfersko pražnjenje u samo postrojenje ( $R_D$ ), veoma velika.

### Defazifikacija

Primenjujući fuzzy odlučivanje u proceni fuzzy skupova  $C$  i  $R_D$  dobija se zavisnost rizika od koeficijenta  $C$  (slika 4.6). Algoritam aproksimativnog rezonovanja čini skup svih pravila u proceni rizika kvara od atmosferskog pražnjenja u postrojenje, a može se grafički predstaviti primenom softverskog alata "Fuzzy Logic Toolbox – Matlab". Na ovaj način moguće je za veliki broj zadatih vrednosti za fuzzy skup  $C$  procenjivati rizike od atmosferskog pražnjenja, kao što je prikazano na slici 4.7 [65, 71].



Slika 4.6: Zavisnost rizika  $R_D$  od koeficijenta  $C$



Slika 4.7: Ukupan rizik  $R_D$  u zavisnosti od  $C$

Sa slike 4.7 se može zaključiti da je za meru izvedene gromobranske instalacije koja se opisuje sa  $C = 0,0945$  procenjena vrednost rizika od direktnog atmosferskog pražnjenja  $R_D = 9,47 \cdot 10^{-6}$ , što se poklapa sa usvojenim pravilima da je za veoma malu vrednost  $C$  dobijena vrednost koja opisuje rizik  $R_D$  veoma mala i zadovoljava uslov dat izrazom (4.8).

U tabeli 4.18 prikazane su vrednosti ukupnog rizika  $R_D$  u funkciji zadatih vrednosti za  $C$  dobijenih primenom softverskog alata "*Fuzzy Logic Toolbox – Matlab*". Fuzzy skup  $C$  je zadat od vrednosti 0 (kada je 100% efikasna gromobranska instalacija) do vrednosti 1 (kada nema gromobranske instalacije) sa korakom od 0,08.

Tabela 4.18: Zavisnost rizika  $R_D$  od koeficijenta  $C$

$C$	$R_D$	$C$	$R_D$
0	$8,8 \cdot 10^{-6}$	0,56	$4,82 \cdot 10^{-5}$
0,08	$9,31 \cdot 10^{-6}$	0,64	$5,39 \cdot 10^{-5}$
0,16	$1,82 \cdot 10^{-5}$	0,72	$6,03 \cdot 10^{-5}$
0,24	$2,35 \cdot 10^{-5}$	0,8	$6,42 \cdot 10^{-5}$
0,32	$2,8 \cdot 10^{-5}$	0,88	$7,31 \cdot 10^{-5}$
0,4	$3,42 \cdot 10^{-5}$	0,96	$7,92 \cdot 10^{-5}$
0,48	$4,03 \cdot 10^{-5}$	1	$7,93 \cdot 10^{-5}$

Na osnovu grafika prikazanog na slici 4.7 i podataka iz tabele 4.18 može se zaključiti da je za meru gromobranske instalacije koja je opisana sa  $C = 0$ , (što bi značilo da je najbolje moguće izvedena gromobranska instalacija), procenjena vrednost rizika od atmosferskog pražnjenja  $R_D = 8,8 \cdot 10^{-6}$ , što zadovoljava uslov dat izrazom



(4.8). Ovaj zaključak verno opisuje realno stanje s obzirom da ne postoji 100% efikasna gromobranska zaštita, odnosno uvek postoji rizik da će atmosfersko pražnjenje izazvati oštećenje dela postrojenja. Za meru gromobranske instalacije koja je opisana sa  $C = 1$ , (što bi značilo da ne postoji gromobranska instalacija), procenjena vrednost rizika od atmosferskog pražnjenja je  $R_D = 7,93 \cdot 10^{-5}$ . Ova vrednost rizika  $R_D$  ne zadovoljava uslov dat izrazom (4.8). Procenjena vrednost rizika  $R_D$  odgovara najvećem mogućem riziku, što je u skladu sa pretpostavkom o nepostojanju gromobranske instalacije [73].

## **5. METODOLOGIJA PRORAČUNA RIZIKA KVARA, TROŠKOVA GUBITAKA I NEISPORUČENE ELEKTRIČNE ENERGIJE USLED DIREKTNOG ATMOSFERSKOG PRAŽNjenja U VETROTURBINU**

Vetroturbine su visoki nestandardni objekti koji se obično instaliraju na lokacijama na kojima je izokeraunički nivo veoma visok i zbog toga su često izložene atmosferskim pražnjenjima. Iz tog razloga ih je neophodno zaštititi od atmosferskih pražnjenja kako bi se izbegli ekonomski gubici koji nastaju kao posledica štete koja se nanosi ovom prilikom. Kako bi se minimizirali troškovi, velika pažnja se pridaje zaštiti osoblja, ali i smanjenju troškova održavanja.

Prilikom projektovanja sistema zaštite od atmosferskih pražnjenja kod vetroturbina potrebno je izvršiti procenu rizika od atmosferskih pražnjenja ili/i mogućnosti oštećenja objekta. Oštećenje se može desiti na lopaticama vetroturbina, mehaničkim delovima, ali i električnim i kontrolnim sistemima. Takođe su ljudi u blizini vetroturbina izloženi opasnosti od napona dodira i napona koraka kao i eksplozijama prouzrokovanim atmosferskim pražnjenjem.

Cilj svakog sistema zaštite od atmosferskog pražnjenja je smanjenje opasnosti/rizika na tolerantan/podnošljiv nivo  $R_T$ . Procena tolerantnog nivoa se zasniva na dozvoljenom riziku kod procene ugroženosti ljudskog života. Ukoliko je procenjeni rizik ispod dozvoljenog nivoa, tada dalja procena potrebe za zaštitom obuhvata ekonomsku analizu, koja podrazumeva procenu troškova sistema zaštite u odnosu na troškove koji nastaju usled štete pri atmosferskom pražnjenju.

Određivanje vrednosti podnosivog rizika je propisano važećim standardom. Reprezentativna vrednost podnosivog rizika  $R_T$ , kada atmosferska pražnjenja uključuju gubitak ljudskog života ili trajne povrede, je  $10^{-5}$  godina<sup>-1</sup> [1].

Rizik od atmosferskih pražnjenja za bilo koji objekat je funkcija visine objekta, lokalne topologije zemljišta i lokalnog nivoa grmljavinske aktivnosti. Informacije u vezi lokalnih vremenskih uslova bi se trebale prikupljati kada god je to moguće (naročito na geografskim širinama gde je potrebno obratiti posebnu pažnju na zimske vremenske uslove). Rizik od atmosferskih pražnjenja se detaljno može proceniti na osnovu standarda IEC 62305-2. Međutim, kako su opisane procedure obuhvaćene ovim standardom veoma složene, ovde je opisan jednostavniji način za procenu rizika od

atmosferskog pražnjenja za pojedinačne vetroturbinе i primena ovog postupka za vetroelektrane. Vetroelektrana se planira na lokacijama gde je zabeležena pojava adekvatnih vetrova, što se uglavnom poklapa sa lokacijama koje se nalaze na većim visinama odnosno u brdovito-planinskom regionu gde je isto tako zabeležen veći broj atmosferskih pražnjenja. Atmosferska pražnjenja u brdovito-planinskom regionu su uglavnom pozitivnog polariteta čija je vrednost amplitude struje atmosferskog pražnjenja znatno veća od amplitude atmosferskog pražnjenja negativnog polariteta [72, 74]. Atmosferska pražnjenja pozitivnog polariteta čine 10 % od svih atmosferskih pražnjenja i odlikuje ih veća amplituda struje pražnjenja [74]. Zato je jako bitno korektno izvesti gromobransku instalaciju vetroelektrane. Uprkos adekvatno izvedenoj gromobranskoj zaštiti može doći do oštećenja delova vetroturbinе usled atmosferskog pražnjenja u vetroturbinu ili u delove povezane sa njom. Zbog ove činjenice od velikog značaja je sprovođenje procene rizika kvara od atmosferskog pražnjenja u vetroturbinu ili u delove povezane sa njom [75].

Standard IEC 62305 analizira efikasnost prihvatnog sistema gromobranske instalacije metodom kotrljajuće sfere. Ipak, primena metoda kotrljajuće sfere, za vrlo visoke strukture u kakve spadaju i vetroturbinе, nije potvrđen [76]. Iako je bilo dosta analiziranih atmosferskih pražnjenja u vrlo visoke objekte i predloženo je mnogo metoda za konstrukciju zone zaštite, nijedan metod još nije usvojen sa odgovarajućim rezultatima [76].

Prilikom procene rizika od atmosferskih pražnjenja treba imati na umu da je pojava atmosferskih pražnjenja stohastičke prirode, te da nije moguće napraviti potpuno precizna kratkoročna predviđanja broja atmosferskih pražnjenja za pojedinačne vetroturbinе ili vetroelektrane.

Trendovi u konstrukciji modernih vetroturbinа diktiraju povećanje visine stuba iznad 130 m kao i povećanje dužine samih lopatica. Visina stuba vetroturbinа sa lopaticom kada se ona nalazi u najvišoj tački, dostiže i do 200 m. Objekti koji su tako velikih visina, bilo da se radi o vetroturbinama instaliranim na kopnu ili da se radi o vetroturbinama instaliranim na moru, su vrlo često izloženi atmosferskim pražnjenjima. Srednja učestanost ukupnog broja atmosferskih pražnjenja za Evropu iznosi 3.9 – 8.0 % atmosferskih pražnjenja u vetroturbinu, za posmatrani period od 1991. – 1998. godine [77]. U Japanu je srednja učestanost ukupnog broja atmosferskih pražnjenja oko

10 – 20 % za posmatrani period 2000. – 2006. godine [78]. Na obalama japanskog mora ta vrednost iznosi oko 30 % [79]. U periodu 2003. – 2011. godine vršeno je merenje karakterističnih veličina atmosferskih pražnjenja u vetroelektranu Nikaho-Kogen koja se nalazi na planinskom terenu na 500 m od obale Japana. Vetroelektrana sadrži 15 vetroturbina visine stuba od 93 m [76]. Za posmatrani period minimum 95 % atmosferskih pražnjenja je bilo uzlazno i to 77 % pozitivnih, 8 % negativnih i 15 % bipolarnih.

Učestalost atmosferskog pražnjenja je još i veća od pomenutih s obzirom da se visine modernih vetroturbina ubrzano povećavaju. Unutar vetroelektrane Horns Rev II koja se nalazi u Severnom moru pored Esbjerga u Danskoj, a u pogonu je od 2009. godine sa 91 vetroturbinom tipa Siemens SWT-2.3-93, zabeležena su 289 atmosferska pražnjenja u periodu od juna 2009. do septembra 2012. godine [84, 85].

Statistički podaci ukazuju na činjenicu da su atmosferska pražnjenja jedan od najčešćih uzroka oštećenja lopatica vetroturbine [85], kao i oštećenja ostalih vitalnih delova vetroturbina, kao npr. prenosnog sistema [86 – 88] i ostale električne opreme [82 – 84]. Atmosfersko pražnjenje je najveći uzročnik otkaza vetroturbina i neisporučene električne energije u prenosnu mrežu [89]. Statistički podaci pokazuju da se na godišnjem nivou, prosečno 3,5 – 10 % instaliranih vetroturbina nađe van pogona usled direktnih atmosferskih pražnjenja u vetroturbine [90].

Proračun rizika kvara i troškova gubitaka usled direktnog atmosferskog pražnjenja u vetroturbinu je od velikog značaja kako za vlasnika vetroelektrane, tako i za proizvođače vetroturbina. Sa aspekta vlasnika svako atmosfersko pražnjenje može prouzrokovati ispad jedne ili više vetroturbina koje će dovesti do smanjenja proizvodnje električne energije i povećanja operativnih troškova. U tom pogledu naročito su opasna atmosferska pražnjenja u visokonaponske elemente priključnog postrojenja, koja mogu dovesti do ispada celokupne vetroelektrane. Obično je grmljavinska aktivnost povezana i sa vetrovitim vremenom, tako da je verovatnoća ispada značajne snage proizvodnje, dosta velika. Sagledavanje rizika kvara usled direktnog atmosferskog pražnjenja u vetroturbinu u fazi planiranja vetroelektrane je od posebnog značaja za sagledavanje celokupnog rizika i nesigurnosti u investiciju izgradnje vetroelektrane.

Od posebnog značaja je sagledavanje rizika kvara usled direktnog atmosferskog pražnjenja u vetroturbinu, zato što svako atmosfersko pražnjenje, bez obzira na njegove

posledice, iziskuje zaustavljanje i inspekciju vetroturbine. Ovo povećava vreme neraspoloživosti vetroturbine. Sa druge strane proizvođač se obično ugovorno obavezuje prema vlasniku vetroelektrane u pogledu garantovane raspoloživosti vetroturbine. Visoka garantovana raspoloživost je jedan od bitnih faktora u odlučivanju pri izboru tipa vetroturbine za izgradnju vetroelektrane. Iz tog razloga proizvođači vetroturbinu teže da ponude što veću garantovanu raspoloživost. Realna raspoloživost će zavisiti u velikoj meri od izokerauničkog nivoa i rizika kvara usled direktnog atmosferskog pražnjenja u vetroturbinu.

### 5.1 Metodologija proračuna rizika kvara kod vetroturbinu

Rizik  $R$  se definiše kao vrednost verovatnog prosečnog godišnjeg gubitka [1]. Ovaj rizik je potrebno proceniti za svaku vrstu oštećenja i gubitka koji se može pojaviti na vetroturbinu ili u njenoj blizini. Za zaštitu vetroturbinu od atmosferskog pražnjenja od značaja su dva tipa gubitaka  $L1$  i  $L4$ , kojima su pridruženi odgovarajući rizici  $R_S$ ,  $R_F$  i  $R_O$  [1]. Njihov opis je prikazan u Tabeli 5.1.

Tabela 5.1: Opis rizika u zavisnosti od tipa oštećenja i gubitaka

<i>Tip gubitka</i>	<i>L1 Gubitak ljudskog života</i>	<i>L4 Gubitak ekonomske prirode</i>
D1 Povrede živih bića	$R_S$	$R_S^b$
D2 Fizičko oštećenje	$R_F$	$R_F$
D3 Oštećenje opreme unutar vetroturbinu	$R_O^a$	$R_O$
<sup>a</sup> Ako pražnjenje ugrožava ljudski život <sup>b</sup> Ako pražnjenje ugrožava životinje		

U tabeli 5.2 prikazani su izvori oštećenja, tipovi oštećenja i tipovi gubitaka.

Oznake u tabeli 5.1 i tabeli 5.2 imaju sledeće značenje:

S1 – direktno pražnjenje u vetroturbinu,

S2 – pražnjenje u neposrednu blizinu vetroturbinu,

S3 – pražnjenje u dalekovod kojim je vetroturbina povezana na elektroenergetski sistem,

S4 – pražnjenje u neposrednu blizinu dalekovoda,

D1 – povrede živih bića,

D2 – fizičko oštećenje (vatra, eksplozija, mehaničko oštećenje...),

D3 – oštećenje opreme unutar vetroturbin (pretvarači i ostali delovi vetroturbin...),

L1, L4 – tipovi gubitaka čiji je uzrok dat u tabeli 5.1.

U nastavku rada su opisani rizici i komponente rizika od atmosferskog pražnjenja u vetroturbinu.

Tabela 5.2: Načini obeležavanja izvora oštećenja, tipova oštećenja i tipova gubitaka

<i>Mesto pražnjenja</i>	<i>Izvor oštećenja</i>	<i>Tip oštećenja</i>	<i>Tip gubitka</i>
Direktno pražnjenje u vetroturbinu	S1	D1 D2 D3	L1, L4
Pražnjenje u neposrednu blizinu vetroturbin	S2	D3	L1, L4
Pražnjenje u dalekovod kojim je vetroturbina povezana na distributivnu mreži	S3	D1 D2 D3	L1, L4
Pražnjenje u neposrednu blizinu dalekovoda	S4	D3	L1, L4

### 5.1.1 Rizici usled atmosferskih pražnjenja u vetroturbinu

$R_l$  – rizik ugroženosti ljudskog života

$R_e$  – rizik ekonomskog značaja

### 5.1.2 Komponente rizika usled atmosferskih pražnjenja u vetroturbinu

$R_A$  – komponenta rizika koja se odnosi na povrede ljudi unutar vetroturbin i povrede živih bića uzrokovanih naponom dodira

$R_B$  – komponenta rizika koja se odnosi na fizičko oštećenje

$R_C$  – komponenta rizika koja se odnosi na fizičko oštećenje i povrede živih bića prouzrokovanih indukovanim prenaponima usled atmosferskih pražnjenja u vetroturbinu ili u blizinu vetroturbine.

### 5.1.3 Komponente rizika usled atmosferskih pražnjenja u vod koji je povezan sa vetroturbinom

$R_U$  – komponenta rizika koja se odnosi na povrede ljudi unutar vetroturbine

$R_V$  – komponenta rizika koja se odnosi na fizičko oštećenje (požar, eksplozija...)

$R_W$  – komponenta rizika koja se odnosi na oštećenje internih sistema unutar vetroturbine.

### 5.1.4 Komponente rizika usled atmosferskih pražnjenja u blizinu voda koji je povezan sa vetroturbinom

$R_Z$  – komponenta rizika koja se odnosi na oštećenje elektronskih sistema unutar vetroturbine uzrokovanih indukovanim prenaponima

Rizik od gubitka ljudskog života se određuje iz sledećeg izraza:

$$R_1 = R_A + R_B + R_C^{(3)} + R_U + R_V + R_W^{(3)} + R_Z^{(3)} \quad (5.1)$$

Rizik od ekonomskog gubitka se određuje iz sledećeg izraza:

$$R_4 = R_A^{(4)} + R_B + R_C + R_U^{(4)} + R_V + R_W + R_Z \quad (5.2)$$

gde je: 3) – samo u slučaju da atmosfersko pražnjenje ugrožava ljudski život,

4) – samo u slučaju da atmosfersko pražnjenje ugrožava životinje

### 5.1.5 Komponente rizika koje se odnose na izvor oštećenja

$$R = R_D + R_I \quad (5.3)$$

Oznaka  $R_D$  predstavlja rizik usled direktnog atmosferskog pražnjenja u vetroturbinu (izvor oštećenja S1). Ovaj rizik određuje se iz izraza:

$$R_D = R_A + R_B + R_C \quad (5.4)$$

Oznaka  $R_I$  predstavlja rizik usled atmosferskog pražnjenja ako se ono desi u blizini vetroturbine (izvor oštećenja S3 i S4) i izračunava se iz izraza:

$$R_I = R_U + R_V + R_W + R_Z \quad (5.5)$$

### 5.1.6 Komponente rizika u odnosu na tip oštećenja

Rizik usled atmosferskog pražnjenja predstavlja se izrazom:

$$R = R_S + R_F + R_O \quad (5.6)$$

gde je  $R_S$  rizik od povreda živih bića D1 koji je dat izrazom:

$$R_S = R_A + R_U \quad (5.7)$$

Rizik  $R_F$  je rizik od fizičkog oštećenja D2 koji je dat izrazom:

$$R_F = R_B + R_V \quad (5.8)$$

Rizik  $R_O$  je rizik od otkaza elektronskog sistema D3 koji je dat izrazom:

$$R_O = R_C + R_W + R_Z \quad (5.9)$$

Rizik od oštećenja vetroturbina,  $R_x$  usled atmosferskog pražnjenja zavisi od godišnjeg broja atmosferskih pražnjenja  $N_x$ , verovatnoće da će atmosfersko pražnjenje da izazove oštećenje  $P_x$  i posledice od oštećenja na godišnjem nivou  $L_x$ , i generalno se određuje primenom sledećeg izraza:

$$R_x = N_x \cdot P_x \cdot L_x \quad (5.10)$$

gde:

$N_x$  zavisi od gustine atmosferskog pražnjenja,

$P_x$  zavisi od karakteristika objekta koji se štiti i projektovane gromobranske zaštite,

$L_x$  zavisi od namene objekta koji se štiti, prisutnosti osoblja, da li je objekat od javnog značaja kao i od mera predviđenih za ograničenje od gubitaka usled atmosferskog pražnjenja.

## 5.2 Zbirni pregled komponenti rizika usled atmosferskog pražnjenja u vetroturbinu

U tabeli 5.3 predstavljene su komponente rizika usled atmosferskog pražnjenja u vetroturbinu u zavisnosti od različitih tipova oštećenja prouzrokovanih različitim lokacijama atmosferskog pražnjenja. Značenje parametara iz tabele 5.3 dato je u tabeli 5.4 [91].



Tabela 5.3: Prikaz rizika u zavisnosti od tipa oštećenja i lokacije atmosferskog pražnjenja

$S \backslash D$	$S1$	$S2$	$S3$	$S4$	$RD$
$D1$	$R_A = N_D \cdot P_A \cdot L_A$		$R_U = N_L \cdot P_U \cdot L_U$		$R_S = R_A + R_U$
$D2$	$R_B = N_D \cdot P_B \cdot L_B$		$R_V = N_L \cdot P_V \cdot L_V$		$R_F = R_V + R_B$
$D3$	$R_C = N_D \cdot P_C \cdot L_C$	$R_M = N_M \cdot P_M \cdot L_M$	$R_W = N_L \cdot P_W \cdot L_W$	$R_Z = (N_i - N_l) \cdot P_Z \cdot L_Z$	$R_O = R_Z + R_W + R_C$
$RS$	$R_D = R_A + R_B + R_C$		$R_I = R_U + R_V + R_W + R_Z$		$R = R_D + R_I$

gde su:

$S$  – Izvor oštećenja,  $D$  – Tip oštećenja

$RS$  – Ukupan rizik sa aspekta izvora oštećenja

$RD$  – Ukupan rizik sa aspekta tipa oštećenja

Tabela 5.4: Značenje parametara iz tabele 5.3

<i>Simbol</i>	<i>Značenje</i>
Srednja vrednost broja atmosferskih pražnjenja na godišnjem nivou	
$N_D$	u vetroturbinu
$N_M$	u blizinu vetroturbine
$N_L$	u vod koji je povezan sa vetroturbinom
$N_I$	u blizinu voda koji je povezan sa vetroturbinom
Verovatnoća da će atmosfersko pražnjenje u vetroturbinu izazvati	
$P_A$	povrede živih bića
$P_B$	fizičko oštećenje same vetroturbine
$P_C$	otkaz internih sistema unutar vetroturbine
Verovatnoća da će atmosfersko pražnjenje u blizinu vetroturbine izazvati	
$P_M$	otkaz internih sistema
Verovatnoća da će atmosfersko pražnjenje u vod koji je povezan sa vetroturbinom izazvati	
$P_U$	povrede živih bića
$P_V$	fizičko oštećenje same vetroturbine
$P_W$	otkaz internih sistema unutar vetroturbine
Verovatnoća da će atmosfersko pražnjenje u blizini voda izazvati	
$P_Z$	otkaz internih sistema unutar vetroturbine
Gubitak zbog	
$L_A=L_U=r_a \cdot L_t$	povrede živih bića
$L_B=L_V=r_p \cdot r_f \cdot h_z \cdot L_f$	fizičkog oštećenja
$L_C=L_M=L_W=L_Z=L_o$	otkaz internih sistema

Srednja vrednost broja atmosferskih pražnjenja na godišnjem nivou u dalekovod koji je povezan sa vetroturbinom proračunava se prema sledećem izrazu:

$$N_D = N_g \cdot A_d \cdot C_d \cdot 10^{-6} \quad (5.11)$$

gde su:

$N_g$  – gustina atmosferskog pražnjenja na godišnjem nivou (1/km<sup>2</sup>/god),

$A_d$  – prihvatna površina vetroturbine (m<sup>2</sup>),

$C_d$  – faktor koji zavisi od okoline vetroturbine koji se određuje iz tabele 5.5

Parametar  $N_g$  određuje se iz [91]:

$$N_g \approx 0,1 \cdot T_d \quad (5.12)$$

gde je  $T_d$  – broj grmljavinskih dana na godišnjem nivou koji se određuje iz izokerauničke karte određenog regiona.

Tabela 5.5: Zavisnost faktora  $C_d$  od okoline

<i>Lokacija</i>	$C_d$
Vetroturbina na ravnom tlu	1
Vetroturbina u brdima	2

Srednja vrednost broja atmosferskih pražnjenja na godišnjem nivou u vetroelektranu proračunava se prema sledećem izrazu:

$$N_L = N_g \cdot A_l \cdot C_d \cdot C_t \cdot 10^{-6} \quad (5.13)$$

gde su:

$A_l$  – prihvatna površina vetroturbine [m<sup>2</sup>],

$C_t$  – korekcionni faktor koji se odnosi na broj transformatora između tačke atmosferskog pražnjenja i vetroturbine, a koji se određuje iz tabele 5.6.

Tabela 5.6: Prikaz faktora  $C_t$

<i>Transformatori</i>	$C_t$
Postojanje transformatora između vetroturbine i atmosferskog pražnjenja	0,2
Bez transformatora između vetroturbine i atmosferskog pražnjenja	1

Srednja vrednost broja atmosferskih pražnjenja na godišnjem nivou u blizini vetroturbine proračunava se prema sledećem izrazu:

$$N_I = N_g \cdot A_i \cdot C_e \cdot C_t \cdot 10^{-6} \quad (5.14)$$

gde su:

$A_i$  – prihvatna površina vetroturbine [ $m^2$ ],

$C_e$  – korekcionni faktor okoline koji za seosku okolinu iznosi 1

Vrednosti verovatnoće  $P_A$  prema [91] u funkciji mera zaštite su date u tabeli 5.7. Ukoliko je upotrebljeno više mera zaštite, vrednost  $P_A$  predstavlja proizvod odgovarajućih vrednosti verovatnoća  $P_A$ .

Tabela 5.7: Vrednost verovatnoće  $P_A$  da će atmosferska pražnjenja u vetroturbinu prouzrokovati povrede kod živih bića usled napona dodira i napona koraka

<i>Mere zaštite</i>	$P_A$	<i>Komentar</i>
Bez mera zaštite	1	
Električna izolacija izloženog provodnika (min 3mm unakrsno povezan polietilen)	$10^{-2}$	Nije značajno za vetroturbine koje koriste toranj (stub) objekta kao spusni provodnik
Efektivna ekvipotencijalizacija tla	$10^{-2}$	Obavezno za vetroturbine koje sadrže visokonaponsku opremu u saglasnosti sa standardima
Upozoravajuća obaveštenja	$10^{-1}$	

Verovatnoća  $P_B$  [91], da će atmosfersko pražnjenje u vetroturbinu na koju je priključen dalekovod da izazove fizičko oštećenje, prikazana je u zavisnosti od nivoa zaštite (tabela 5.8).

Verovatnoće  $P_C$ ,  $P_V$ ,  $P_W$ ,  $P_Z$  da će atmosfersko pražnjenje u vetroturbinu na koju je priključen dalekovod da izazove oštećenje na opremi u dalekovodu prikazane su u tabeli 5.9 u zavisnosti od nivoa zaštite.

Tabela 5.8: Vrednosti verovatnoće  $P_B$  u zavisnosti od mera zaštite od fizičkih oštećenja

<i>Karakteristike vetroturbine</i>	<i>Nivo zaštite od atmosferskih pražnjenja (LPS nivo)</i>	$P_B$
Vetroturbina nema zaštitu od atmosferskih pražnjenja (LPS)	-	1
Vetroturbina ima ugrađenu zaštitu od atmosferskih pražnjenja	IV	0,2
	III	0,1
	II	0,05
	I	0,02
Vetroturbina sa gromobranskom zaštitom lopatica i gondole u skladu sa LPS-om i stubom koji predstavlja kontinualan prirodni spusni provodnik		0,01
Vetroturbina sa gromobranskom zaštitom lopatica, metalnog krova gondole i kompletnom zaštitom bilo kog krova gondole od direktnih udara groma i stubom koji predstavlja kontinualan prirodni spusni provodnik		0,001

Tabela 5.9: Verovatnoće  $P_C, P_V, P_W, P_Z$  u zavisnosti od nivoa zaštite

<i>Nivo zaštite</i>	$P_C, P_V, P_W, P_Z$
Vetroturbina bez prenaponske zaštite	1
III-IV	0,03
II	0,02
I	0,01

Gubitak ljudskog života određuje se na osnovu vrednosti gubitaka  $L_x$ . Vrednost gubitaka  $L_x$  moguće je proceniti na osnovu relacije:

$$L_x = (n_p / n_t) \cdot (t_p / 8760) \quad (5.15)$$

gde je:

$n_p$  – broj potencijalno ugroženih osoba,

$n_t$  – očekivani ukupni broj osoba u vetroturbini,

$t_p$  – [h/god] vreme koje su osobe provele na opasnom mestu, izvan vetroturbine.

Na gubitak ljudskog života utiču karakteristike konstrukcije vetroturbine, koje se kod proračuna uzimaju u obzir povećanjem vrednosti faktora koji povećava gubitak kada je prisutan dodatni rizik  $h_z$  i smanjenjem faktora  $r_f, r_p, r_a, r_u$  na sledeći način:

$$L_A = r_a \cdot L_t \quad (5.16)$$

$$L_U = r_u \cdot L_t \quad (5.17)$$

$$L_B = L_V = r_p \cdot h_z \cdot r_f \cdot L_f \quad (5.18)$$

$$L_C = L_M = L_W = L_Z = L_o \quad (5.19)$$

gde su:

$L_A$  – gubitak koji se odnosi na povrede živih bića,

$L_B$  – gubitak u objektu nastao usled fizičkih oštećenja,

$L_C$  – gubitak koji se odnosi na otkaze unutrašnjih sistema (atmosferska pražnjenja u vod),

$L_M$  – gubitak koji se odnosi na otkaze unutrašnjih sistema (atmosferska pražnjenja u blizini objekta),

$L_U$  – gubitak koji se odnosi na povrede živih bića (atmosferska pražnjenja u vod)

$L_V$  – gubitak u objektu usled fizičkog oštećenja (atmosferska pražnjenja u vod),

$r_a$  – redukcionni faktor gubitka ljudskog života u zavisnosti od tipa zemljišta,

$r_u$  – redukcionni faktor gubitka usled fizičkog oštećenja u zavisnosti od vrste podloge,

$r_p$  – redukcionni faktor gubitka usled fizičkog oštećenja u zavisnosti od mogućnosti požara u vetroturbini,

$r_f$  – redukcionni faktor gubitka usled fizičkog oštećenja kada je prisutan rizik,

$h_z$  – faktor dodatnog rizika.

U tabeli 5.10 date su vrednosti redukcionnih faktora  $r_a$  i  $r_u$  u funkciji vrste površine tla.

Tabela 5.10: Vrednosti redukcionnih faktora  $r_a$  i  $r_u$  u funkciji vrste površine tla

<i>Vrsta podloge</i>	<i>Kontaktni otpor [kΩ]</i>	<i><math>r_a</math> i <math>r_u</math></i>
poljoprivredna površina, beton	$\leq 1$	$10^{-2}$
mramor, keramika	1 do 10	$10^{-3}$
šljunak	10 do 100	$10^{-4}$
asfalt, drvo	$\geq 100$	$10^{-5}$

Gubitak usled fizičkog oštećenja vetroturbine koji može da se toleriše je:

$$L_B = L_V = r_p \cdot r_f \cdot h_z \cdot L_f \quad (5.20)$$

gde su:  $L_f$  – gubitak usled fizičkog oštećenja vetroturbine koji se određuje iz izraza:

$$L_f = \frac{n_p}{n_t} \cdot \frac{t_p}{8760} \quad (5.21)$$

pri čemu su:

$n_p$  – broj mogućih žrtava koje su u opasnosti ako dođe do atmosferskog pražnjenja u vetroturbinu,

$n_t$  – ukupan broj prisutnih osoba u blizini vetroturbine,

$t_p$  – broj sati na godišnjem nivou, kada su u blizini vetroturbine, prisutne osobe.

Prema [88] može se usvojiti  $L_f = 0,33$  za vetroturbinu.

Faktori  $r_p$  i  $r_f$  prikazani su u tabelama 5.11 i 5.12 respektivno.

Tabela 5.11: Korekcionni faktor  $r_p$  u funkciji mera za smanjenje posledica požara

<b><i>Mere za smanjenje posledica požara</i></b>	<b><math>r_p</math></b>
Ne postoje preduzete mere	1
Postojanje jedne od sledećih mera: aparat za gašenje požara, ručno podešavanje. instalacija za gašenje požara, ručno pokretanje alarma za gašenje požara, hidranti, zaštićeni putevi evakuacije	0,5
Postojanje jedne od sledećih mera: automatsko podešena instalacija za gašenje požara, automatsko pokretanje alarma za gašenje požara	0,2

Tabela 5.12: Vrednosti redukcionog faktora  $r_f$  u funkciji rizika od požara u vetroturbinu

<b><i>Rizik od požara</i></b>	<b><math>r_f</math></b>
Visok	$10^{-1}$
Normalan	$10^{-2}$
Nizak	$10^{-3}$
Bez rizika	0

Vrednosti faktora  $h_z$  u zavisnosti od dodatnih opasnosti date su u tabeli 5.13.

Tabela 5.13: Vrednosti faktora  $h_z$  u zavisnosti od dodatnih opasnosti

<b><i>Vrsta dodatne opasnosti</i></b>	<b><math>h_z</math></b>
Bez dodatne opasnosti	1
Nizak nivo panike	2
Teškoće pri evakuaciji	5

Ekonomski gubitak moguće je odrediti na osnovu vrednosti  $L_t$ ,  $L_f$  i  $L_o$  koje se mogu odrediti iz sledeće jednačine:

$$L_x = c / c_t \quad (5.22)$$

gde su:

$c$  – srednja vrednost mogućeg gubitka vetroturbine (uključujući njen sadržaj, prihode) izražene u NJ

$c_t$  – ukupna vrednost vetroturbine (uključujući njen sadržaj i prihode) izražene u NJ

Tipične vrednosti  $L_t$ ,  $L_f$  i  $L_o$  koje se koriste u slučaju kada su vrednosti  $c$  i  $c_t$  nesigurne ili teške za određivanje, date su u tabeli 5.14.

Tabela 5.14: Tipične srednje vrednosti  $L_t$ ,  $L_f$  i  $L_o$

<b>Vetroturbina</b>	<b>Vrednost</b>
$L_t$ (sadržaj unutar vetroturbine)	$10^{-4}$
$L_t$ (sadržaj izvan vetroturbine)	$10^{-2}$
$L_f$	$10^{-1}$
$L_o$	$10^{-4}$

Ekonomski gubici su određeni karakteristikama objekta koje se uzimaju u obzir povećavanjem  $h_z$  i smanjivanjem redukcionih faktora.

Gubitak usled oštećenja opreme unutar vetroturbine usvaja se da iznosi:

$$L_c = L_w = L_z = 10^{-3} \quad (5.23)$$

Područje atmosferskih pražnjenja u blizini vetroturbine se posmatra u funkciji parametara struje pražnjenja kako bi se omogućilo dimenzionisanje, analiza i testiranje sistema zaštite od atmosferskih pražnjenja. Ovaj proces je detaljno opisan u standardu IEC 62305-1 [58] gde su predstavljena četiri nivoa zaštite (I do IV). Za svaki nivo zaštite od atmosferskih pražnjenja, određene su maksimalne i minimalne vrednosti struje pražnjenja.

Maksimalne vrednosti parametara struje pražnjenja značajnih za prvi nivo zaštite neće biti prekoračene sa verovatnoćom od 99%. Ove vrednosti parametara struje pražnjenja koji su značajni za prvi nivo zaštite su smanjene na 75% za drugi nivo zaštite i 50 % za treći i četvrti nivo zaštite.

U tabeli 5.15 prikazane su maksimalne vrednosti parametara atmosferskog pražnjenja u zavisnosti od različitih nivoa zaštite. U tabeli 5.16 prikazane su minimalne vrednosti parametara atmosferskog pražnjenja u zavisnosti od nivoa zaštite i poluprečnika kotrljajuće sfere. U tabeli 5.17 predstavljene su verovatnoće da će struje atmosferskih pražnjenja biti manje od vrednosti koje su prikazane u tabeli 5.15 i veće od vrednosti koje su prikazane u tabeli 5.16.

Tabela 5.15: Maksimalne vrednosti parametara atmosferskog pražnjenja u zavisnosti od nivoa zaštite

<i>Parametri atmosferskog pražnjenja</i>			<i>Nivo zaštite</i>			
Parametar	Oznaka	Jedinica	I	II	III	IV
Amplituda struje atmosferskog pražnjenja	<i>I</i>	kA	200	150	100	
Količina naelektrisanja	<i>Q</i>	C	100	75	50	
Specifična energija	<i>W/R</i>	MJ/Ω	10	5,6	2,5	
Vremenski parametri	<i>T<sub>1</sub>/T<sub>2</sub></i>	μs/μs	10/350			

Tabela 5.16: Minimalne vrednosti parametara atmosferskog pražnjenja u zavisnosti od nivoa zaštite

<i>Parametri atmosferskog pražnjenja</i>			<i>Nivo zaštite</i>			
	Oznaka	Jedinica	I	II	III	IV
Minimalna vrednost struje atmosferskog pražnjenja	<i>I</i>	kA	3	5	10	16
Poluprečnik kotrljajuće sfere	<i>r</i>	m	20	30	45	60

Tabela 5.17: Verovatnoće da su parametri atmosferskog pražnjenja u granicama datim u tabelama 5.15 i 5.16

<i>Verovatnoća da će parametri atmosferskog pražnjenja biti:</i>	<i>Nivo zaštite</i>			
	I	II	III	IV
Manji od vrednosti koje su prikazane u tabeli 5.16	0,99	0,98	0,97	0,97
Veći od vrednosti koje su prikazane u tabeli 5.17	0,99	0,97	0,91	0,84



U tabeli 5.18 prikazane su dozvoljene vrednosti rizika  $R_T$  u zavisnosti od tipova gubitaka.

Tabela 5.18: Dozvoljene vrednosti rizika  $R_T$  u zavisnosti od tipova gubitaka

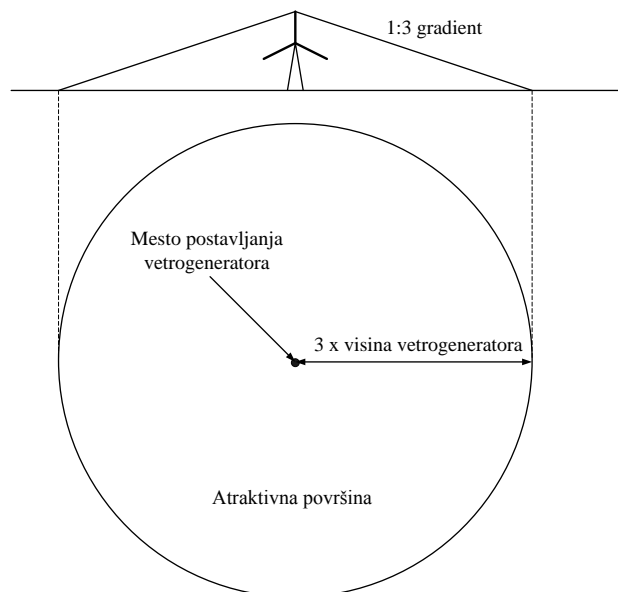
<i>Tipovi gubitaka</i>	$R_T$
Gubitak ljudskog života ili povrede	$10^{-5}$
Gubitak od javnog značaja	$10^{-3}$

Iz tabele 5.18, a prema [1], može se zaključiti da je tolerisan rizik od atmosferskog pražnjenja u dopuštenim granicama ako je zadovoljen uslov:

$$R_T < 10^{-5} \quad (5.24)$$

Pod ekvivalentnom prihvatnom površinom vetroturbine se podrazumeva površina horizontalnog tla koja ima istu učestanost direktnih udara gromova kao i posmatrana vetroturbina.

Ekvivalentna prihvatna površina vetroturbine se određuje u preseku površine tla i ravni povučene sa vrha objekta, nagnute u odnosu na horizontalnu ravan u odnosu 1:3. Rotiranjem nagnute ravni oko vetroturbine u preseku sa horizontalnom ravni se dobija geometrijsko mesto tačaka koje ograničava ekvivalentnu prihvatnu površinu [91]. Na slici 5.1 prikazana je prihvatna površina vetroturbine smeštene na ravnoj podlozi. Uočava se da je prihvatna površina kružnica, radijusa tri puta većeg od visine vetroturbine.



Slika 5.1: Prihvatna površina vetroturbine

Prihvatna površina vetroturbine određuje se iz izraza:

$$A = 9 \cdot \pi \cdot (H)^2 \cdot 10^{-6} \quad (5.25)$$

gde su:

$A$  – prihvatna površina vetroturbine [ $m^2$ ],

$H$  – visina vetroturbine [m].

### 5.3 Procena troškova gubitaka

Trošak ukupnih gubitaka  $C_L$  predstavljen je relacijom:

$$C_L = (R_A + R_U) \cdot C_A + (R_B + R_V) \cdot (C_A + C_B + C_S + C_C) + (R_C + R_M + R_W + R_Z) \cdot C_S \quad (5.26)$$

gde su:

$R_A$  i  $R_U$  – komponente rizika koje se odnose na gubitke životinja, bez mera zaštite,

$R_B$  i  $R_V$  – komponente rizika koje se odnose na fizička oštećenja, bez mera zaštite,

$R_C$ ,  $R_M$ ,  $R_W$ ,  $R_Z$  – komponente rizika koje se odnose na otkaze električnih i elektronskih sistema, bez mera zaštite.

Ukupni trošak  $C_{RL}$  ostalih gubitaka uprkos merama zaštite se može proračunati na osnovu sledeće relacije:

$$C_{RL} = (R'_A + R'_U) \cdot C_A + (R'_B + R'_V) \cdot (C_A + C_B + C_S + C_C) + (R'_C + R'_M + R'_W + R'_Z) \cdot C_S \quad (5.27)$$

gde su:

$R'_A$  i  $R'_U$  – komponente rizika koje se odnose na gubitke životinja, bez mera zaštite,

$R'_B$  i  $R'_V$  – komponente rizika koje se odnose na fizička oštećenja, sa merama zaštite,

$R'_C$ ,  $R'_W$ ,  $R'_Z$  – komponente rizika koje se odnose na otkaze električnih i elektronskih sistema, sa merama zaštite,

$C_A$  – troškovi životinja,

$C_B$  – troškovi sistema u vetroturbini,

$C_S$  – trošak vetroturbine,

$C_C$  – trošak sadržaja vetroturbine.

Najveći deo troškova pojavljuje se prilikom instaliranja gromobranske instalacije i to su tzv. investicioni troškovi. Tokom eksploatacije gromobranske instalacije pojavljuju se eksploatacioni troškovi.

Godišnja interesna (kamatna) stopa  $i$  omogućava poređenje troškova koji se javljaju u različitim vremenskim periodima. Kamatna stopa  $i$  predstavlja procenat uvećanja uloženih novčanih sredstava na kraju svake godine da kojim slučajem nisu uložena u gromobransku instalaciju.

Ukupni godišnji troškovi obuhvataju i troškove amortizacije. Uprošćeno, stopa amortizacije predstavlja recipročnu vrednost veka trajanja elementa. Godišnji troškovi amortizacije mogu se definisati i kao troškovi koji bi, ako bi se izdvajali svake godine, davali na kraju perioda eksploatacije vrednost jednaku ukupnim investicionim troškovima [1]. Godišnja stopa održavanja predstavlja novčana sredstva na godišnjem nivou koja se izdvajaju radi održavanja gromobranske instalacije u ispravnoj funkciji.

Ukupni godišnji troškovi gromobranske instalacije prema [1] proračunavaju se pomoću izraza:

$$C_{PM} = C_P \cdot (i + a + m) \quad (5.28)$$

gde je:

$C_P$  (NJ) – troškovi proizvodnje,

$i$  – godišnja kamatna stopa,

$a$  – godišnja stopa amortizacije,

$m$  – godišnja stopa održavanja.

Pretpostavljene vrednosti za kamatnu stopu, stopu amortizacije i stopu održavanja prikazane su u tabeli 5.19.

Tabela 5.19: Pretpostavljene vrednosti za kamatnu stopu, stopu amortizacije i stopu održavanja

<i>Stopa</i>	<i>Simbol</i>	<i>Vrednost</i>
kamatna	<i>i</i>	0,04
amortizacije	<i>a</i>	0,05
održavanja	<i>m</i>	0,01

Ušteda novca  $S$ , upotrebom gromobranske instalacije, na godišnjem nivou može se proceniti upotrebom sledećeg izraza:

$$S = C_L - (C_{PM} + C_{RL}) \quad (5.29)$$

Zaštita je odgovarajuća sa ekonomskog aspekta ukoliko je godišnja ušteda novca:

$$S > 0 \quad (5.30)$$

#### 5.4 Procena neisporučene električne energije usled direktnog atmosferskog pražnjenja u vetroturbinu

Vrednosti neisporučene električne energije na mesečnom nivou mogu se predstaviti izrazima u zavisnosti od grmljavinske aktivnosti. Izrazi 5.31 i 5.32 prikazuju zavisnost neisporučene električne energije ( $W_{neisp.el.}$ ) od proizvedene električne energije ( $W_{el.en.}$ ), verovatnoće da će direktno atmosfersko pražnjenje u vetroturbinu izazvati ispad vetroturbine ili ispad celog pripadajućeg postrojenja ( $P_B$  i  $P_C$  respektivno [89], tabela 5.8 i tabela 5.9) i prosečne verovatnoće pojave atmosferskog pražnjenja po mesecima  $P_g$ . Prosečna verovatnoća pojave atmosferskog pražnjenja je proračunata za dvadesetogodišnji period 1994 ÷ 2013 [92].

$$W_{neisp.el.VT} [\text{MWh/danu/turbini}] = P_B \cdot P_g \cdot W_{el.en.} [\text{MWh/danu/turbini}] \quad (5.31)$$

$$W_{neisp.el.VNP} [\text{MWh/danu/turbini}] = P_C \cdot P_g \cdot W_{el.en.} [\text{MWh/danu/turbini}] \quad (5.32)$$

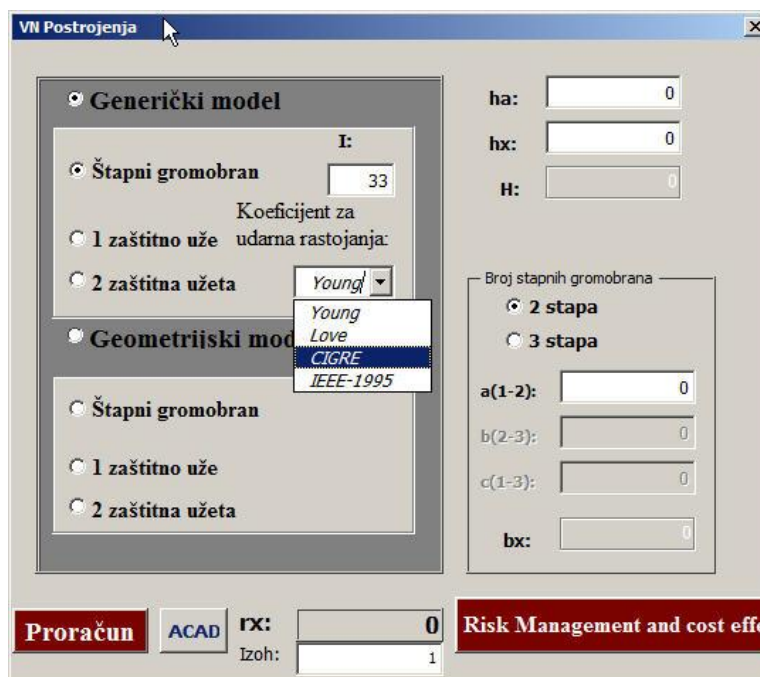
Pošto  $P_g$  predstavlja verovatnoću pojave atmosferskog pražnjenja po mesecima za posmatranu lokaciju, to ne znači da će svako atmosfersko pražnjenje izazvati ispad vetroturbine ili ispad postrojenja. Zato je potrebno u izraze 5.31 i 5.32 uvrstiti i verovatnoće da će direktno atmosfersko pražnjenje u vetroturbinu izazvati ispad iste ili

ispad pripadajućeg postrojenja ( $P_B$  i  $P_C$  respektivno [91], tabela 5.8 i tabela 5.9). Na taj način se dobija verovatnoća da se oba događaja istovremeno realizuju.

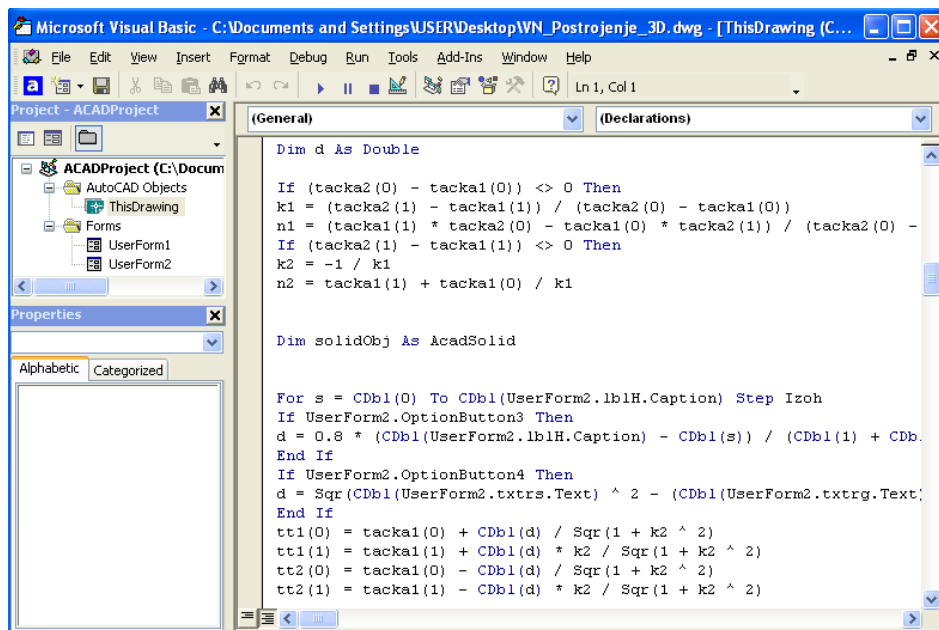
## 6. FORMIRANJE ALGORITMA I SOFTVERSKIH ALATA ZA MODELOVANJE ZONE ZAŠTITE I PROCENU RIZIKA KVARA OD DIREKTNOG ATMOSFERSKOG PRAŽNJENJA U POSTROJENJE

Korišćenje softverskih alata sa ciljem poboljšanja efikasnosti projektovanja je intenzivno zastupljeno od osamdesetih godina prošlog veka [85]. Kao rezultat najnovijih tehnoloških trendova u edukaciji elektroinženjera je primena softverskih alata u elektroenergetici koja je sve prisutnija u praksi [39, 52 – 55]. Softverski alati se široko koriste za proračune prelaznih režima, tokova snaga, analize stabilnosti i planiranja.

Na slici 6.1 prikazana je maska razvijenog originalnog softverskog alata "VN Postrojenja" za modelovanje zone zaštite pri projektovanju gromobranske zaštite postrojenja različitih struktura. Konstrukcija objekata se vrši u AutoCAD-u, dok se proračun parametara gromobranske zaštite vrši primenom softverskog alata *Visual Basic for Application*. Deo koda softverskog alata "VN Postrojenja" prikazan na slici 6.2.



Slika 6.1: Maska softverskog alata "VN Postrojenja"



Slika 6.2: Deo koda softverskog alata "VN Postrojenja"

Tok proračuna parametara od značaja za gromobransku zaštitu postrojenja sastoji se od sledećih koraka:

- Prvo se prikazuje maska koja omogućava izbor modela proračuna udarnog rastojanja koje korisnik unese tako što klikne na jedan od metoda (generički ili geometrijski model)
- Ako se odabere generički model proračuna udarnog rastojanja, potrebno je uneti očekivanu vrednost struje atmosferskog pražnjenja, kao i odabrati jedan od tri tipa gromobranskih zaštitnih uređaja (štapna hvataljka, jedno zaštitno uže ili dva zaštitna užeta).
- Unutar generičkog modela moguće je odabrati i izraze prema kojima softverski alat proračunava poluprečnik zone zaštite  $r_x$ , izrazi (3.5), (3.6), (3.7), (3.8) i tabela 3.1
- Ako se odabere geometrijski model proračuna udarnog rastojanja, moguće je odabrati jedan od tri tipa gromobranskih zaštitnih uređaja (štapna hvataljka, jedno zaštitno uže ili dva zaštitna užeta), na osnovu kojih softverski alat proračunava poluprečnik zone zaštite (izrazi (2.1) i (2.6)).
- Moguć je i izbor dva ili tri štapna gromobrana istovremeno.

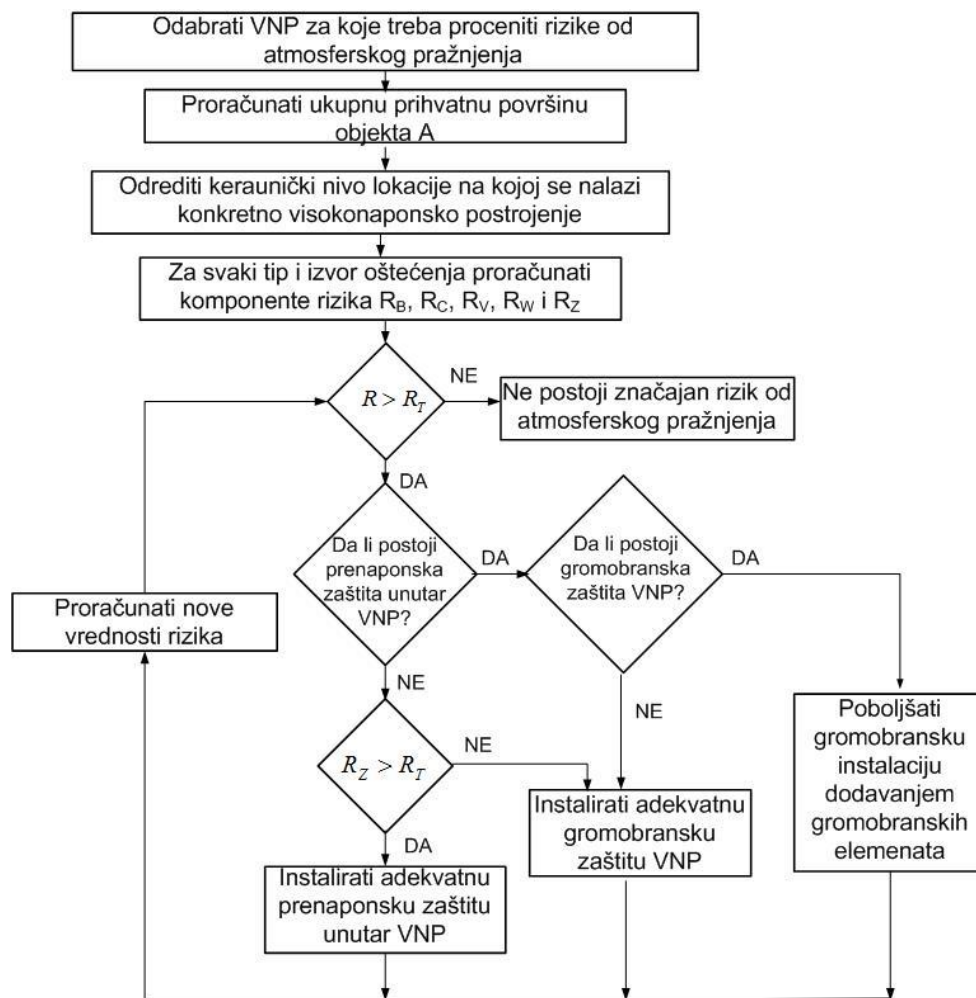
- Sledi izbor visine štapne hvataljke (zaštitnog užeta)  $h_a$  i visine objekta  $h_x$  na koji se štapna hvataljka postavlja, na osnovu čega softverski alat "VN Postrojenja" proračunava poluprečnik zone zaštite  $r_x$  pritiskom na dugme Proračun.
- Posle proračuna prelazi se u AutoCAD, pritiskom na dugme ACAD, i na već postojeći projekat postrojenja, posle postavljanja tipa zaštitnog uređaja (duplim klikom) *štapne* hvataljke ili dvostrukim duplim klikom zaštitnog užeta softverski alat "VN Postrojenja" iscrtava trodimenzionalno i dvodimenzionalno zonu gromobranske zaštite.

Softverski alat "VN Postrojenja" služi za brzu i efikasnu analizu gromobranske instalacije i najkompleksnijeg postrojenja, uključujući sve pripadajuće visokonaponske elemente. Trodimenzionalni prikaz zaštićenog i nezaštićenog dela postrojenja može biti predstavljen različitim bojama tako da je lako uočljiva efikasnost projektovane gromobranske instalacije.

Na slici 6.3 je prikazan algoritam procene rizika od atmosferskog pražnjenja u postrojenja na kome je zasnovan razvijeni, originalni softverski alat "*Risk management and cost effective by IEC-62305*" koji predstavlja nadogradnju postojećeg softverskog alata "VN Postrojenja".

Za potrebe procene rizika od atmosferskog pražnjenja razvijen je softverski alat "*Risk management and cost effective by IEC-62305*" koji automatizuje kompleksne proračune koje zahteva standard IEC 62305-2 [1]. Brz i lak za korišćenje, ovaj softverski alat je osmišljen da inženjerima obezbedi potrebne rezultate za kratko vreme. Softverom je omogućeno da se u postrojenjima istaknu područja visokog rizika od atmosferskog pražnjenja. Takođe je omogućeno biranje odgovarajućih geografskih područja sa pripadajućim brojem grmljavinskih dana  $T_d$ .



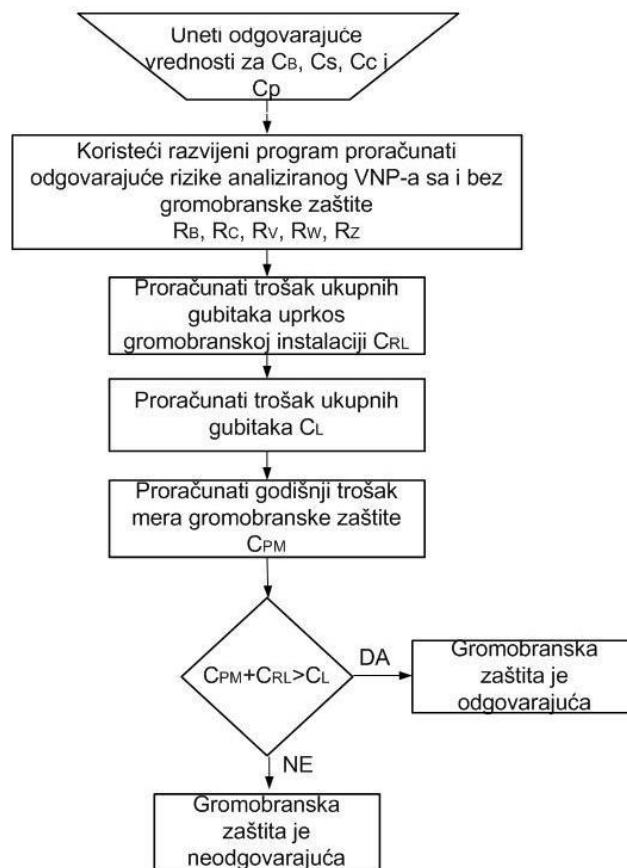


Slika 6.3: Algoritam procene rizika od atmosferskog pražnjenja u postrojenje

Na slici 6.4 je prikazan algoritam za procenu troškova usled gubitaka pri atmosferskom pražnjenju u postrojenje.

Na slici 6.5 je prikazana maska softverskog alata "*Risk management and cost effective by IEC 62305*" za projektovanje gromobranske instalacije postrojenja koji se odnosi na procenu rizika i troškova usled atmosferskog pražnjenja u postrojenje.

Ovaj deo softverskog alata je nadogradnja već postojećeg razvijenog, originalnog softverskog alata "*VN Postrojenja*" za proračun i iscrtavanje zone zaštite postrojenja prikazanog na slici 6.1. Do dela softverskog alata "*Risk management and cost effective by IEC-62305*" dolazi se pritiskom na dugme *Risk management and cost effective* na masici softverskog alata "*VN Postrojenja*" za projektovanje gromobranske instalacije (slika 6.1) [53].



Slika 6.4: Algoritam za isplativost projektovanja gromobranske instalacije postrojenja

Da bi se dobili odgovarajući rizici treba pratiti sledeće korake prilikom popunjavanja aplikacije za procenu rizika od atmosferskog pražnjenja (slika 6.5):

1. Uneti odgovarajuću struju atmosferskog pražnjenja u deo za određivanje nivoa zaštite, na osnovu koga razvijeni softverski alat "*Risk management and cost effective by IEC 62305*" određuje i ispisuje o kojem se nivou zaštite radi.

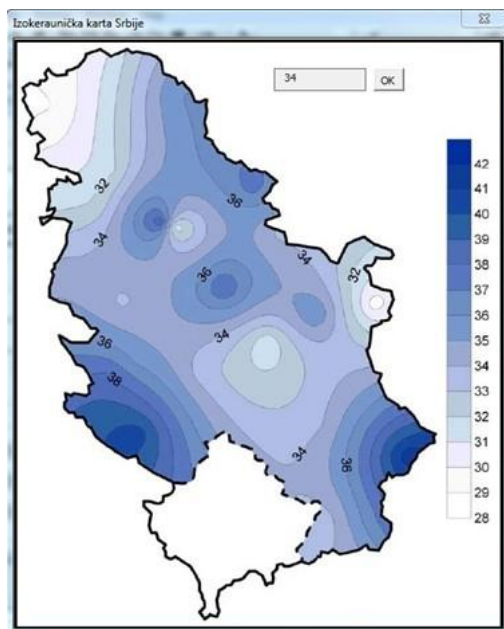
2. Pritiskom na dugme "*Mapa izokerauničkog nivoa*" otvara se posebna aplikacija, prikazana na slici 6.6, sa koje korisnik automatski očitava broj grmljavinskih dana na godišnjem nivou tako što se obeleži odgovarajuća lokacija na prikazanoj mapi. Pritiskom na dugme "*OK*", korisnik se vraća na aplikaciju "*Risk management and cost effective by IEC-62305*". U Republici Srbiji se godišnji broj dana sa nepogodama uglavnom smanjuje od severa ka jugu i od zapada ka istoku [94]. Na slici 6.6 su korišćeni podaci o grmljavinskim nepogodama u periodu od 1991-2005. godine bez podataka za teritoriju Kosova i Metohije [92]. Grmljavina se retko beleži u zimskom delu godine, a retka je i u prelaznim godišnjim dobima. Zbog toga su letnje, a delimično

i prolećne atmosfere nepogode odlučujuće za podatke izokerauničkog nivoa Republike Srbije.

Slika 6.5: Procena rizika i proračun troškova za konkretno postrojenje 220 kV/110 kV/10 kV

3. Korisnik dalje popunjava deo za procenu uticaja okoline na postrojenje tako što odabira adekvatne vrednosti za koeficijente  $C_d$ ,  $C_t$  i  $C_e$  (tabele 5.5, 5.6 i 5.7).
4. Zatim se unose dimenzije svih objekata unutar postrojenja koje treba zaštititi od atmosfere pražnjenja i pritiskom na dugme "Dodaj" proračunava se odgovarajuća ukupna prihvatna površina.
5. Pošto su uneti svi odgovarajući podaci potrebni za proračun srednje vrednosti broja atmosferskih pražnjenja na godišnjem nivou, pritiskom na dugme "Proračun" dobijaju se vrednosti za  $N_D$ ,  $N_L$  i  $N_I$  (izrazi 5.11, 5.13 i 5.14)
6. Sledi unos podataka o proceni verovatnoće nastalih šteta usled atmosfere pražnjenja u blizini i u samo postrojenje, nakon čega se pritiskom na dugme "Proračun" izračunavaju odgovarajući pojedinačni i ukupni rizici.

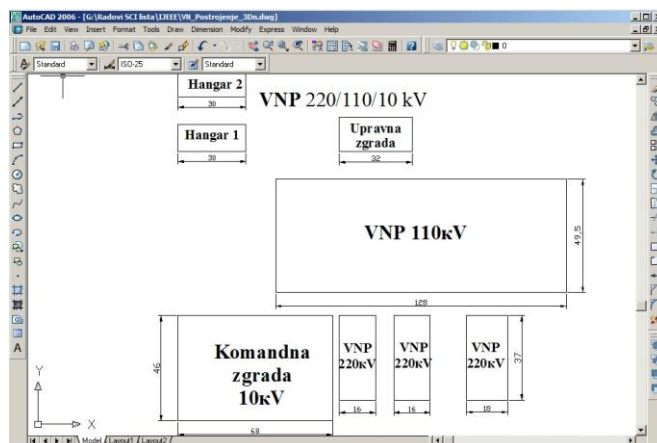
Nakon toga mogu da se unose podaci za troškove  $C_B$ ,  $C_S$ ,  $C_C$  i  $C_P$ . U nastavku program izračunava da li je gromobrnska instalacija odgovarajuća sa ekonomskog aspekta i ispisuje tekst o ekonomskoj isplativosti.



Slika 6.6: Izokeraunička mapa Srbije bez podataka za teritoriju Kosova i Metohije

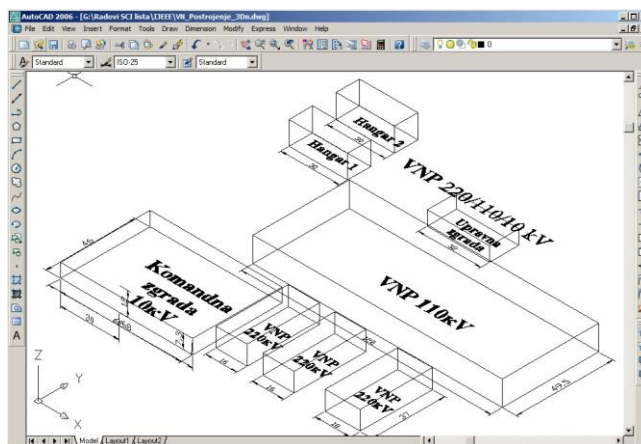
### 6.1 Vizuelizacija zone zaštite postrojenja 220 kV/ 110 kV/ 10 kV

U nastavku je prikazan postupak vizuelizacije zone zaštite proizvoljnog postrojenja 220 kV/110 kV/10 kV. Na slici 6.7 i slici 6.8 prikazan je dvodimenzionalni i trodimenzionalni prikaz razmatranog postrojenja, respektivno.



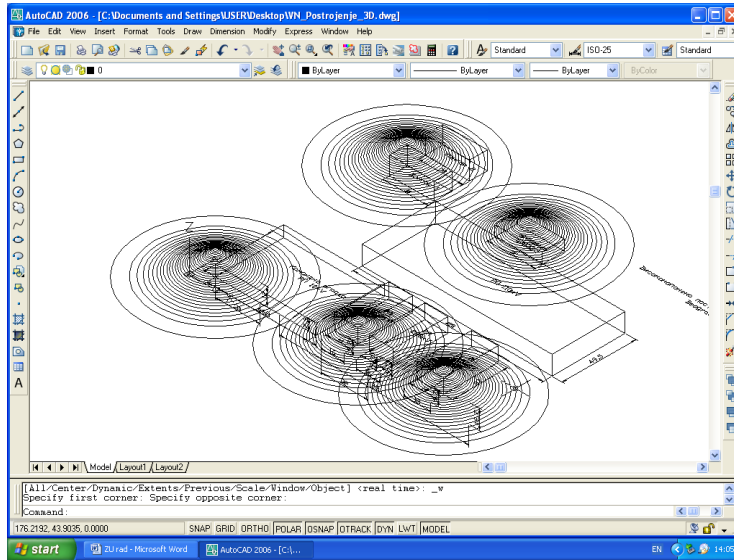
Slika 6.7: Dvodimenzionalni prikaz rasporeda i gabaritnih dimenzija objekata u postrojenju 220 kV/110 kV/10 kV – situacija

Zona zaštite postrojenja, na slici 6.9 je određena primenom generičkog modela za amplitudu struje groma od 33 kA (medijana struje po CIGRE preporuci [95]) i izraza datog od strane Young [3]. Medijana je u statistici ona vrednost struje atmosferskog pražnjenja za koju važi sledeća osobina: verovatnoća da izmerena amplituda struje bude manja od medijane (33 kA) iznosi 50%, dok je verovatnoća da struja bude veća od te vrednosti takođe 50% [61].

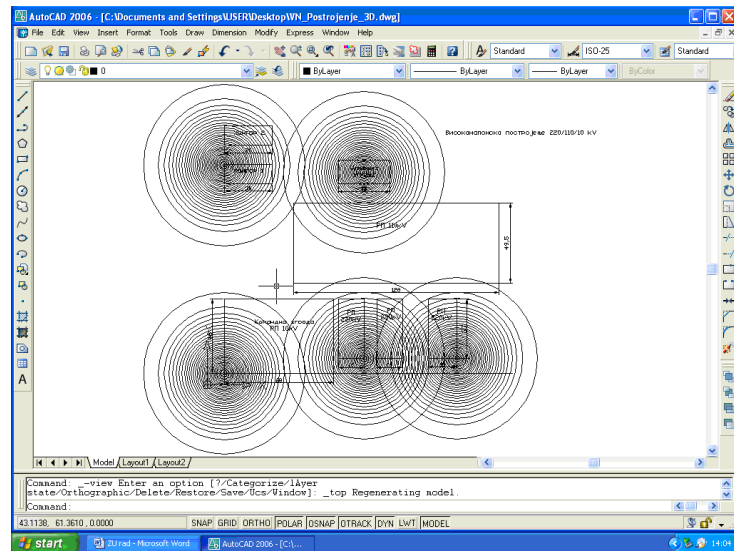


Slika 6.8: Trodimenzionalni prikaz rasporeda i gabaritnih dimenzija objekata u postrojenju 220 kV/110 kV/10 kV

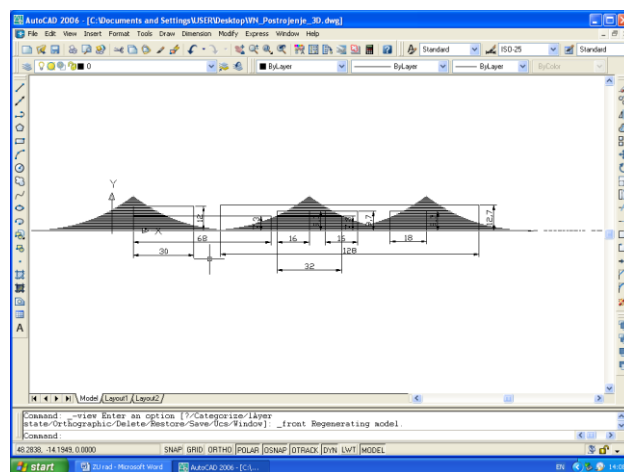
Za realizaciju prihvatnog sistema gromobranske instalacije upotrebljeno je 5 štapnih hvataljki  $h_x = 12$  m i  $h_a = 5$  m rasporeda kao na slici 6.9(a). Različite ilustracije ovako realizovane zaštitne zone postrojenja 220 kV/110 kV/10 kV su prikazane na slikama 6.9(b), 6.9(c) i 6.9(d), respektivno [54]. Na slikama koje predstavljaju trodimenzionalan prikaz punog tela crvenom bojom je prikazan šticeći objekat, a svetlijom sivom bojom ostvarena zona zaštite gromobranske instalacije. Zbog velikog broja štapnih hvataljki koje ne mogu da realizuju efikasnu gromobransku zaštitu potrebno je povećati zonu zaštite dodavanjem i zaštitnih užadi kao gromobranskih elemenata, kao što je prikazano u nastavku disertacije.



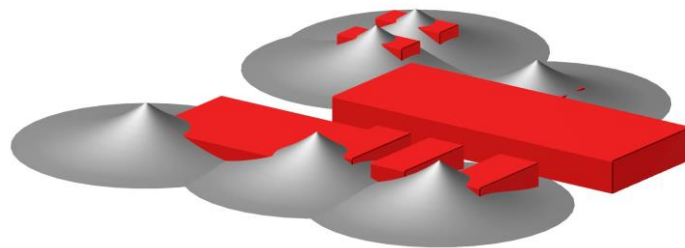
a)



b)



c)

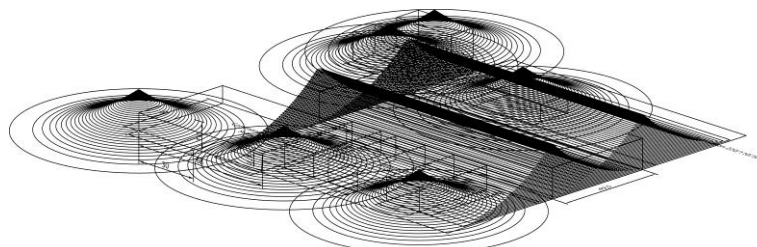


d)

Slika 6.9: Zona zaštite postrojenja ostvarena primenom 6 štapnih hvataljki prema generičkom modelu: a) Trodimenzionalni žičani prikaz; b) Dvodimenzionalni prikaz odozgo, c) Dvodimezionalni prikaz – bočni pogled; d) Trodimenzionalni prikaz punog tela

## 6.2 Analiza uporednog prikaza zone zaštite postrojenja primenom geometrijskog i generičkog modela

Zona zaštite postrojenja, na slici 6.10(a) i 6.10(b) je određena primenom geometrijskog modela za 6 štapnih hvataljki  $h_x = 12$  m i  $h_a = 10$  m (ukupne visine 22 m) i 2 zaštitna užeta visine  $h_a = 10$  m postavljena na objekat visine  $h_x = 12$  m. Na slici 6.10 (a) je prikazan žičani model, a na slici 6.10 (b) renderovan model ostvarene zone zaštite.



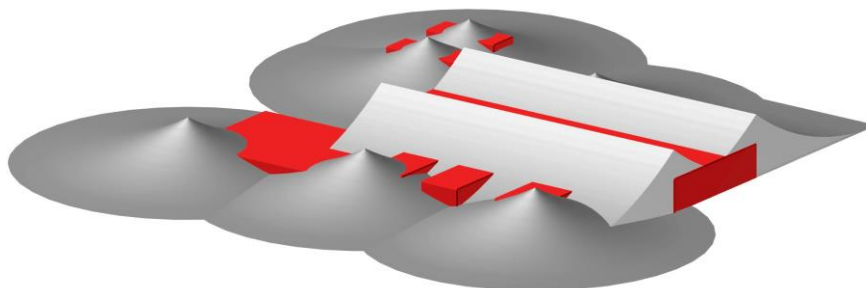
a)



b)

Slika 6.10: Zona zaštite postrojenja, primenom geometrijskog modela; a) žičani model; b) renderovan model

Na slici 6.11 prikazana je realizovana gromobranska zaštita istog postrojenja sa istim brojem i dimenzijama gromobranskih elemenata kao na slici 6.10, ali je primenjen generički model proračuna udarnog rastojanja pri struji atmosferskog pražnjenja od 33 kA i formuli prema Youngu [3].



Slika 6.11: Renderovan model zone zaštite postrojenja prema generičkom modelu

Sa slika 6.10 i 6.11 može se zaključiti da je ostvarena zona zaštite veća ako se udarno rastojanje računa prema generičkom modelu. Ako se analizira postrojenje prema geometrijskom modelu, treba upotrebiti veći broj gromobranskih elemenata prilikom konstruisanja gromobranske zaštite.

U tabeli 6.1 dat je prikaz poluprečnika (širine) zone zaštite  $r_x$  za dve karakteristične visine 0 m i 2 m, koje predstavljaju nivo tla i nivo visine čoveka. Vrednosti udarnih rastojanja  $r_{ud}$  dobijaju se pomoću softverskog alata "VN Postrojenja" opisanog u poglavlju 6. Generički model je realizovan prema autoru Young i pri struji od 33 kA.

Tabela 6.1: Uporedni prikaz poluprečnika (širine) zone zaštite  $r_x$  geometrijskog i generičkog modela

<b>Karakteristične visine <math>h_x(m)</math></b>	<b>Geometrijski model <math>r_x</math> (m)</b>		<b>Generički model <math>r_x</math> (m)</b>	
	Štapna hvataljka	Zaštitno uže	Štapna hvataljka	Zaštitno uže
0 m	35,2	17,6	57,25	57,25
2 m	29,33	14,67	39,18	39,18

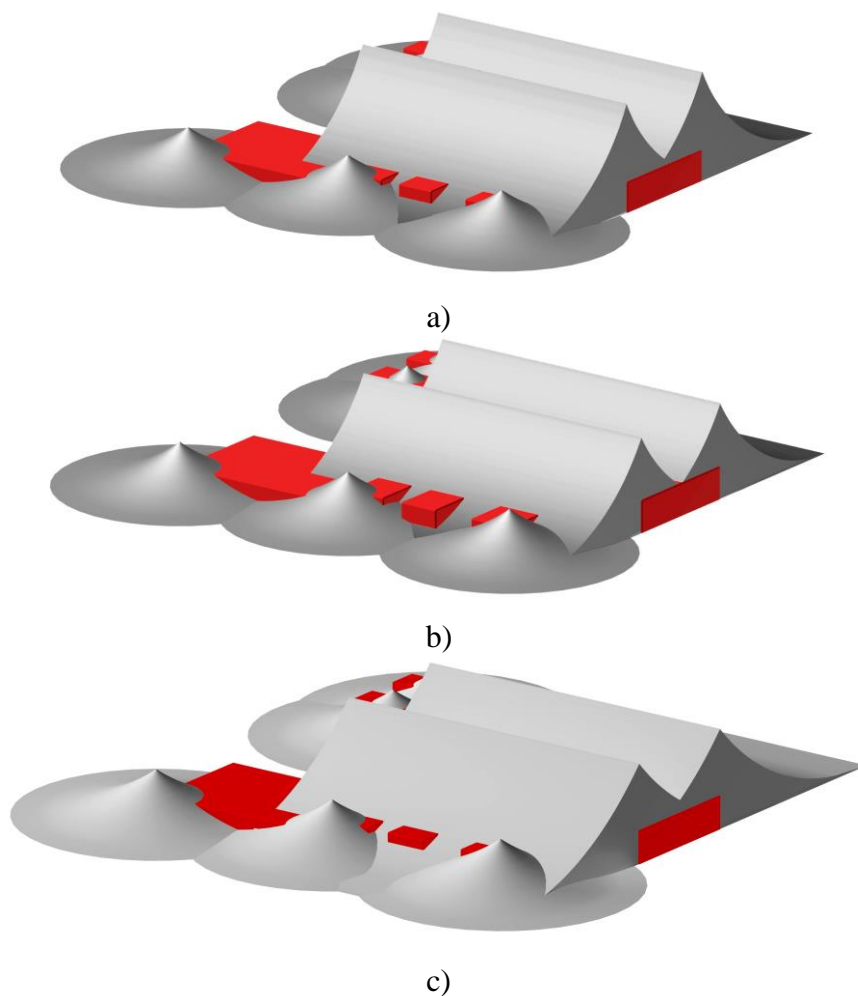
Iz tabele 6.1 se može zaključiti da generički model prikazuje veću zonu zaštite realizovanu štapnom hvataljkom na 0 m visine od geometrijskog modela za 63 %, dok za zaštitno uže ta razlika iznosi 252,3 %. Na 2 m visine generički model prikazuje veću

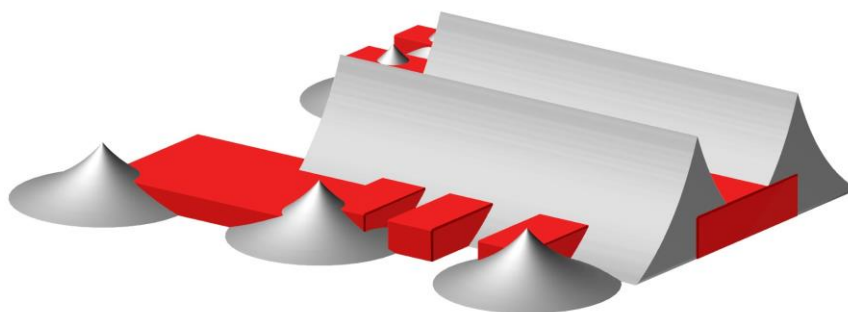


zonu zaštite realizovanu štapnom hvataljkom od geometrijskog modela za 33,6 % dok za zaštitno uže ta razlika iznosi 167 %.

### 6.3 Analiza uporednog prikaza zone zaštite promenom izraza za izračunavanje udarnih rastojanja unutar generičkog modela

Na slikama 6.12 (a), 6.12(b), 6.12(c) i 6.12(d) prikazana je zona zaštite gromobranske instalacije konkretnog postrojenja 220 kV/ 110 kV/10 kV kada su korišćena 2 zaštitna užeta ukupne visine  $H = 25$  m i 6 štapnih hvataljki ukupne visine  $H = 22$  m rasporeda kao na slici 6.9. Korišćeni su različiti koeficijenti za proračun udarnih rastojanja prema autorima Young i Love i radnim grupama (WG) Cigre i IEEE respektivno, a sve prema [3]. Zona zaštite je sračunata pri amplitudi struje atmosferskog pražnjenja od 33 kA.





d)

Slika 6.12: Trodimenzionalni prikaz zone zaštite postrojenja primenom generičkog modela, pri struji od 33 kA: a) Young; b) Love; c) Cigre; d) IEEE

Sa slike 6.12 se zaključuje da se najveća zona zaštite ostvaruje pomoću izraza za udarna rastojanja predložena od strane WG Cigre, a najmanja za izraze predložene od strane WG IEEE.

U tabeli 6.2 dat je prikaz poluprečnika (širine) zone zaštite  $r_x$ , u zavisnosti od izraza predloženih od strane različitih autora, na dve karakteristične visine 0 m (nivo neposredno iznad tla) i 2 m (nivo visine čoveka).

Tabela 6.2: Poluprečnici (širine) zone zaštite  $r_x$  generičkog modela (različiti autori)

Karakteristične visine $h_x(m)$	Štapna hvataljka $r_x(m)$ ; $H=22$ m				Zaštitno uže $r_x(m)$ ; $H=25$ m			
	Young	Love	CIGRE	IEEE	Young	Love	C	IEEE
0 m	57,25	61,54	63,07	54,15	61,06	65,02	69,43	57,07
2 m	39,18	41,93	44,41	36,64	42,98	45,42	50,76	39,56

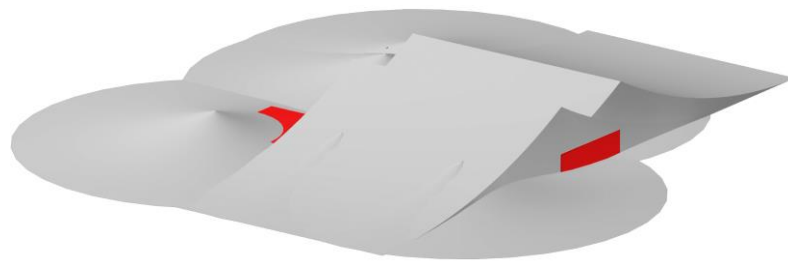
Iz rezultata dobijenih pomoću softverskog alata "VN Postrojenja" i prikazanih u tabeli 6.2 može se zaključiti da su poluprečnici zone zaštite  $r_x$ , štapne hvataljke na 0 m visine, najveći u izrazu predloženom od strane WG CIGRE i to za 16,5 % u odnosu na IEEE, 10 % u odnosu na Young i 2,5 % u odnosu na Love. Ako se koriste izrazi za širinu zone zaštite  $r_x$ , za zaštitno uže razlike su nešto veće i to WG CIGRE rezultira sa  $r_x$  većim u odnosu na IEEE za 21,6 %, u odnosu na Young za 13,7 %, i u odnosu na Love za 7 %.

Poluprečnici zone zaštite  $r_x$ , štapne hvataljke na 2 m visine, najveći su u izrazu predloženom od strane WG CIGRE i to za 21 % u odnosu na IEEE, 13 % u odnosu na Young i 6 % u odnosu na Love. Ako se koriste izrazi za zaštitno uže razlike su nešto

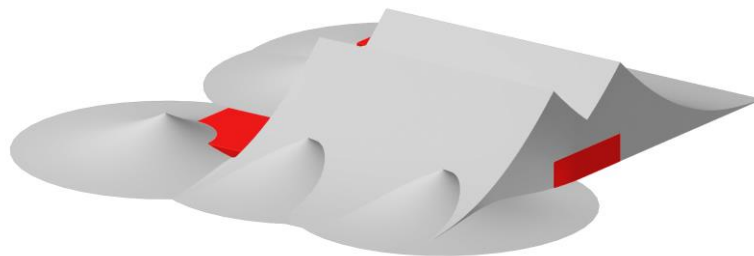
veće i to WG CIGRE rezultuje sa  $r_x$  većim u odnosu na IEEE za 28 %, u odnosu na Young za 18 %, i u odnosu na Love za 12 %.

#### 6.4 Analiza uporednog prikaza zone zaštite pri amplitudama struja atmosferskog pražnjenja od 200 kA prema generičkom modelu

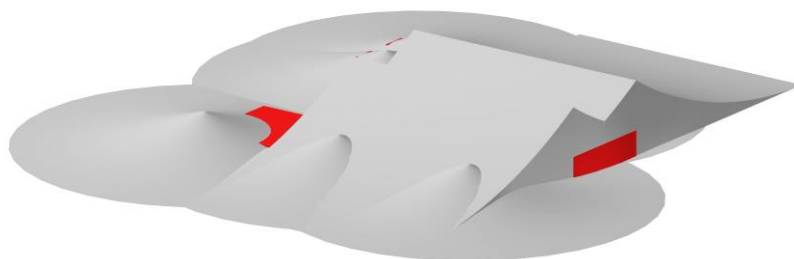
Na slikama 6.13(a), 6.13(b) i 6.13(c) su prikazane realizovane zone zaštite gromobranske instalacije za atmosfersko pražnjenje struje od 200 kA, ostvarene primenom 6 štapnih hvataljki dimenzija  $h_x = 12$  m i  $H = 17$  m i 2 zaštitna užeta visine  $h_x = 12$  m i  $H = 37$  m, za generički model za a) Love; b) Young; c) IEEE-1995



a)



b)



c)

Slika 6.13: Renderovan model realizovane zone zaštite gromobranske instalacije primenom generičkog modela pri 200 kA za a) Love; b) Young; c) IEEE-1995

Sa slike 6.13 se zaključuje da povećanje struje atmosferskog pražnjenja na 200 kA dovodi do povećanja zone zaštite u odnosu na slučaj prikazan na slici 6.12 (33 kA) i da se najveća zona zaštite ostvaruje predloženim izrazom od strane autora Love. U tabeli 6.3 dat je prikaz poluprečnika (širine) zone zaštite, na dve karakteristične visine 0 m i 2 m, za struje atmosferskog pražnjenja 5 kA, 33 kA i 121 kA. Vrednosti struja atmosferskog pražnjenja su izabrane po logaritamsko-normalnoj raspodeli sa verovatnoćom da će struje prevazići naznačene vrednosti od 98 %, 50 % i 2 %.

Tabela 6.3: Uporedni prikaz poluprečnika (širine) zone zaštite  $r_x$  generičkog modela sa promenom amplitude struje pražnjenja

<i>Karakteristične visine <math>h_x(m)</math></i>	<i>Štapna hvataljka i zaštitno uže <math>r_x</math> (m); <math>H=22</math> m</i>		
	5 kA	33 kA	121 kA
0 m	27,73	61,54	97,23
2 m	17,24	41,93	67,24

Iz dobijenih rezultata prikazanih u tabeli 6.3 se može zaključiti da se sa porastom struje atmosferskog pražnjenja od 560 % (sa 5 kA na 33 kA), povećava poluprečnik (širina) zone zaštite za 122 % na 0 m visine i za 143 % na 2 m visine.

## 7. PRIMERI PRIMENE NA REALNIM POSTROJENJIMA

### 7.1 Primer HE "Đerdap 1"

HE "Đerdap 1" je armirano-betonski, hidroenergetski i plovidbeni sistem koji se nalazi na 44°39'51'' geografske širine i 22°31'44'' geografske dužine, na granici između Srbije i Rumunije.

Ovaj objekat čine:

- Prelivna brana,
- Elektrana (plato blok transformatora i mašinska zgrada sa montažnim blokom),
- Brodska prevodnica (uzvodna i nizvodna glava, uzvodna i nizvodna prevodnica, srednja glava i komandni toranj),
- Komandno-administrativna zgrada

Glavni objekat Hidroenergetskog i plovidbenog sistema "Đerdap 1" nalazi se na 10 km uzvodno od Kladova. Objekat je potpuno simetričan, sa prelivnom branom u sredini i po jednom elektranom i prevodnicom sa svake strane. Između prevodnica i obala su neprelivne brane. Ukupna dužina objekta je 1278 m, od toga je prelivna brana dužine 441m, elektrane po 214 m, brodske prevodnice po 53 m i nasute brane uz levu obalu 117m i uz desnu 186 m. Prelivna brana se sastoji od 14 prelivnih polja širine po 25 m i 13 stubova širine po 7 m. Kota krune preliva je 55,2 m, a kota gornje ivice stubova 75,6 m. Prelivna polja su zatvorena ravnim dvodelnim kukastim zatvaračima visine 14,86 m. Maksimalni kapacitet prelivanja preko brane iznosi 15400 m<sup>3</sup>/s.

Prosečna godišnja proizvodnja je oko 6.3 milijardi kWh. U svakoj elektrani instalirano je po šest agregata, ukupne snage 1140 MVA. Agregati se sastoje iz vertikalnih Kaplanovih turbina i vertikalnih hidrogeneratora snage 190 MVA, napona 15,75 kV i brzine obrtanja 71,5 ob/min sa tiristorskim sistemom pobude.

Prevodnice su projektovane za maksimalnu razliku nivoa od 34,4 m, dvostepene su sa komorama dimenzija 310 × 34 m, dubinom vode na pragu 4,5 m na rumunskoj strani i 5,5 m na srpskoj strani i slobodnim gabaritom 10 m na rumunskoj i 13,5 m na srpskoj strani. Uzvodno i nizvodno od svake prevodnice nalaze se predpristaništa dužine oko 600 m i širine oko 100 m.

Prostor između prevodnica i obale zatvoren je na svakoj strani neprelivnom branom. Veza između elektrane i energetskog sistema ostvaruje se preko tronamotajnih transformatora, snage 380 MVA /190 MVA /190 MVA i odnosa transformacija 420 kV /15,75 kV /15,75 kV i postrojenja 400 kV na srpskoj strani. Na slici 7.1 je prikazan blok transformator snage 380 MVA /190 MVA /190 MVA sa delom mašinske zgrade sa šest agregata, ukupne snage 1140 MVA.



Slika 7.1: Blok transformator snage 380 MVA /190 MVA /190 MVA sa delom mašinske zgrade

Postrojenja za naponski nivo 400 kV na obe obale povezana su vazдушnim vodom napona 400 kV i kapacitetom prenosa od 1000 MW. Pored postrojenja 400 kV ova HE sadrži i postrojenje naponskog nivoa 110 kV. Na slici 7.2 prikazano je postrojenje 400 kV HE "Đerdap 1".

Postrojenje HE "Đerdap 1" 400 kV se sastoji iz osam polja i to:

- tri dovodna transformatorska bloka (Blok 1 (G1-G2), Blok 2 (G3-G4), Blok 3 (G5-G6))
- tri izlazna dalekovodna polja 400 kV (Beograd, Bor i Rumunija)
- jedno spojno i
- jedno rezervno polje.



Slika 7.2: Postrojenje 400 kV HE "Đerdap 1"

Postrojenje 400 kV HE "Đerdap 1" ima dva sistema sabirnica i mogućnost premošćenja (u slučaju havarije sabirnica) preko rastavljača. Plato blok transformatora u HE "Đerdap 1" nalazi se na otvorenom prostoru, u produžetku mašinske zgrade. Postrojenje 400 kV, sastavljeno od osam polja i dva sistema sabirnica, štiti se od atmosferskih pražnjenja pomoću 9 zaštitnih užadi postavljenih između ulaznih i izlaznih portala.

Na slici 7.3 je prikazano postrojenje 110 kV HE "Đerdap 1".



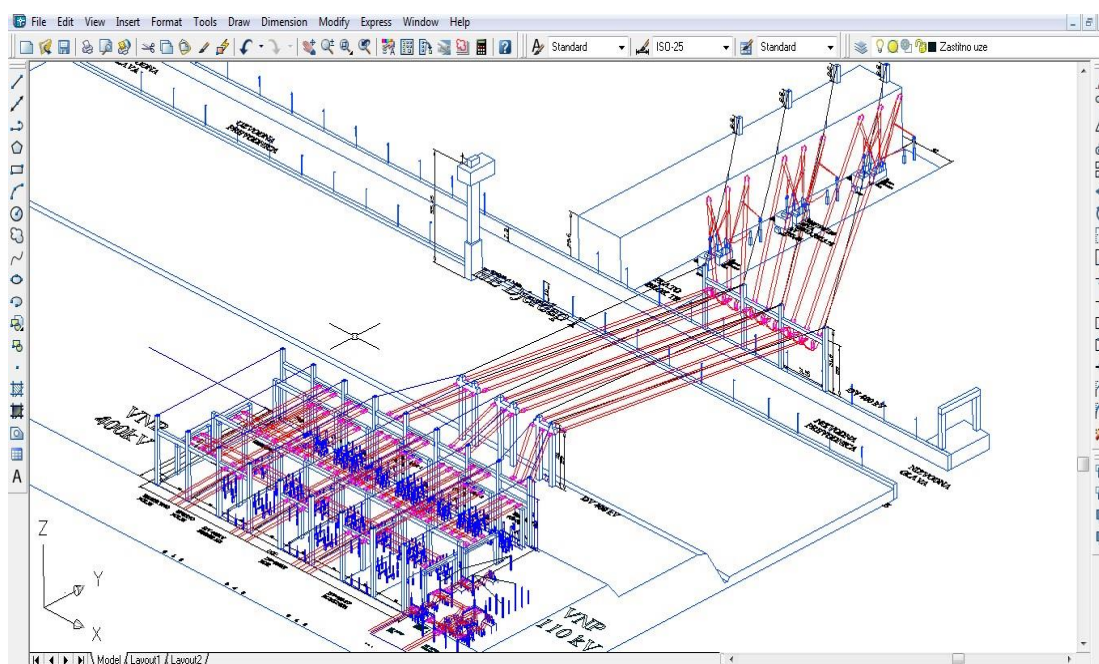
Slika 7.3: Postrojenje 110kV HE "Đerdap 1"

Postrojenje 110kV HE "Đerdap 1" se sastoji iz osam polja i to:

- dva merna polja
- dva transformatorska polja 110 kV (31,5 MVA i 20 MVA)

- dva dalekovodna polja 110 kV (Bor i Rumunija)
- jedno sekciono polje
- jedno rezervno polje

Prihvatni sistem gromobranske instalacije postrojenja 110 kV realizovan je pomoću devet štapnih hvataljki i dva zaštitna užeta. Žičani 3D model HE "Đerdap 1" sa pripadajućim postrojenjem 400 kV i 110 kV, konstruisan primenom softverskog alata AutoCAD [56], prikazan je na slici 7.4.



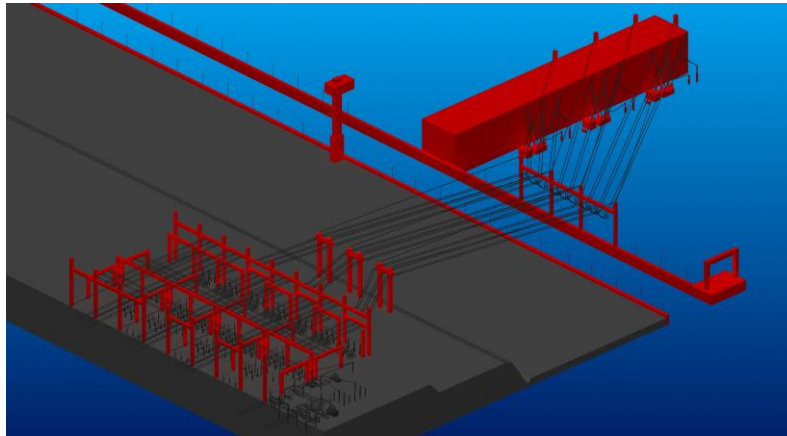
Slika 7.4: Žičani model HE "Đerdap 1" sa pripadajućim postrojenjem 400 kV i 110 kV

Radi bolje preglednosti svih visokonaponskih elemenata, žičani model energetskog objekta HE "Đerdap 1" sa pripadajućim postrojenjem 400 kV i 110 kV prikazan je na slici 10.8 u prilogu.

Radi bolje vizualizacije samog objekta HE "Đerdap 1" primenjena je tehnika renderovanja i prikaz objekta u vidu punog tela (slika 7.5).

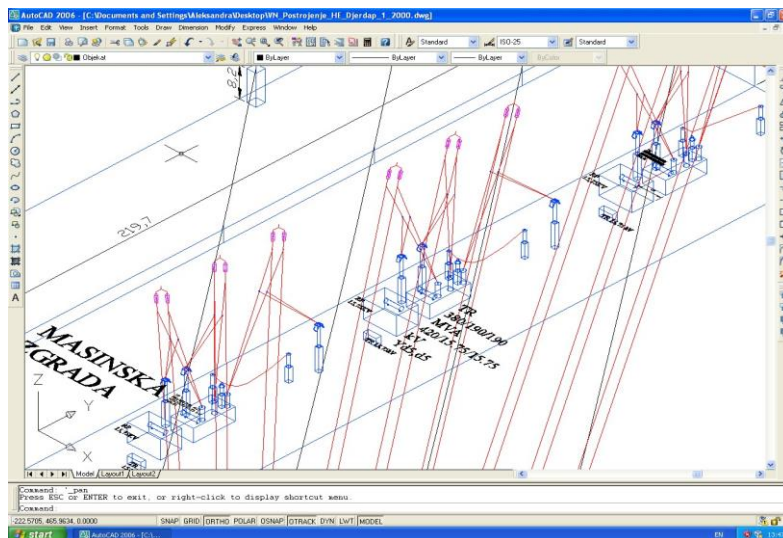
Gromobranska instalacija HE "Đerdap 1" izvedena je pomoću štapnih hvataljki, zaštitnih užadi, mreže provodnika i prirodnog prihvatnog sistema.





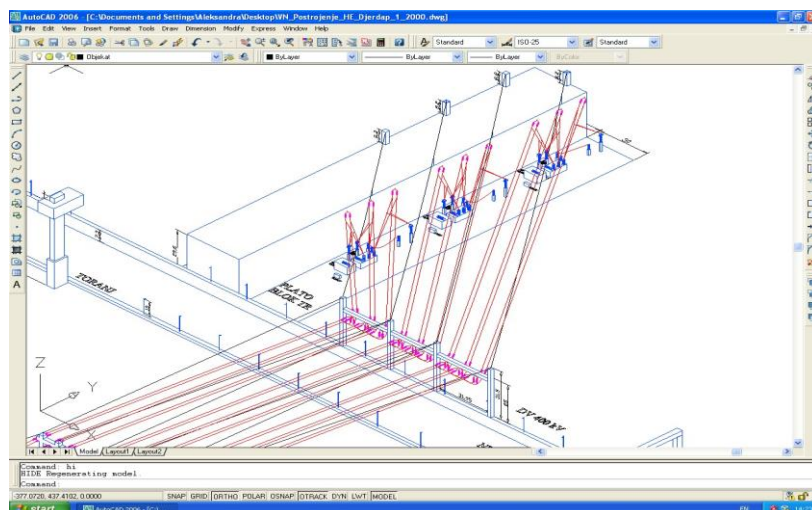
Slika 7.5: Renderovan model HE "Đerdap 1" sa postrojenjima 400 kV i 110 kV

Unutar mašinske zgrade smešteno je šest generatora snage po 190 MVA koji su preko tri blok transformatora 380 MVA /190 MVA /190 MVA, 420 kV /15,75 kV /15,75 kV, Yd5d5, koji se nalaze na otvorenom prostoru platoa blok transformatora, povezani sa postrojenjem 400 kV. Blok transformatori sa pripadajućom visokonaponskom opremom (odvodnici prenapona i rastavljači) prikazani su na slici 7.6. Ista slika je prikazana preglednije u prilogu (slika 10.9).



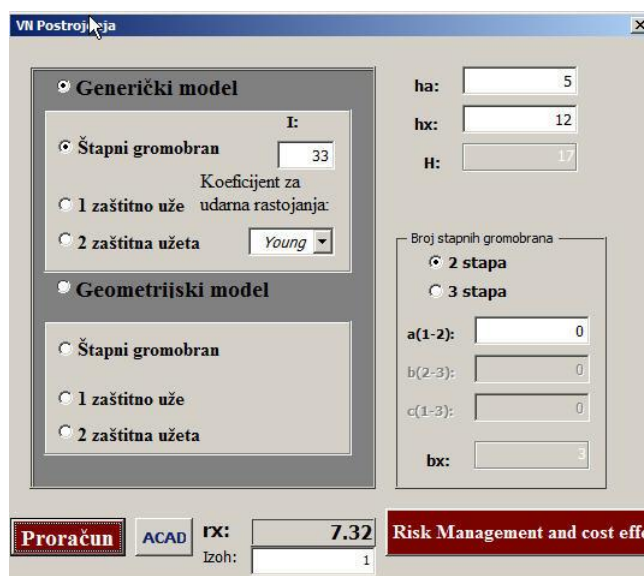
Slika 7.6: Žičani model blok transformatora HE "Đerdap 1"

Prihvatni sistem mašinske zgrade izveden je pomoću četiri metalna stuba visine 8,2 m koji se nalaze na ivicama jednog dela mašinske zgrade i nose zaštitnu užad pripadajućih dalekovoda 400 kV kao što je prikazano na slici 7.7. Ova slika je prikazana preglednije u prilogu na slici 10.10.



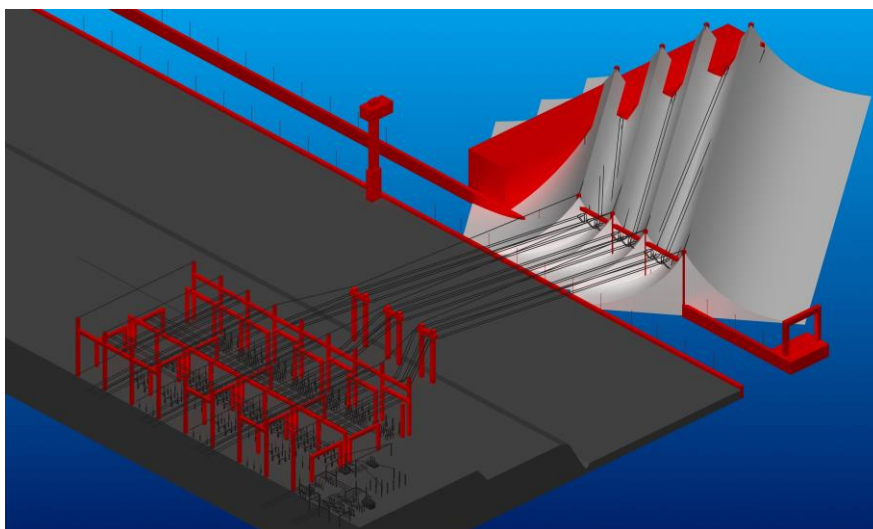
Slika 7.7: Deo prihvatnog sistema mašinske zgrade HE "Đerdap 1"

Prihvatni sistem drugog dela mašinske zgrade izveden je pomoću mreže provodnika. Plato blok transformatora u HE "Đerdap 1" se nalazi na otvorenom prostoru, u produžetku mašinske zgrade, kao što je prikazano na slici 7.7. Da bi se uočila efikasnost gromobranske instalacije mašinske zgrade i platoa blok transformatora HE "Đerdap 1" potrebno je koristiti softverski alat "VN Postrojenja" za izračunavanje i iscrtavanje zone zaštite (slika 7.8). Zona zaštite je obezbeđena sa 4 zaštitna užeta iznad mašinske zgrade na ukupnoj visini od 37,8 m za struju atmosferskog pražnjenja od 33 kA, prema izrazima za proračun predloženih od strane autora Young [3].



Slika 7.8: Maska softverskog alata za proračun zone zaštite

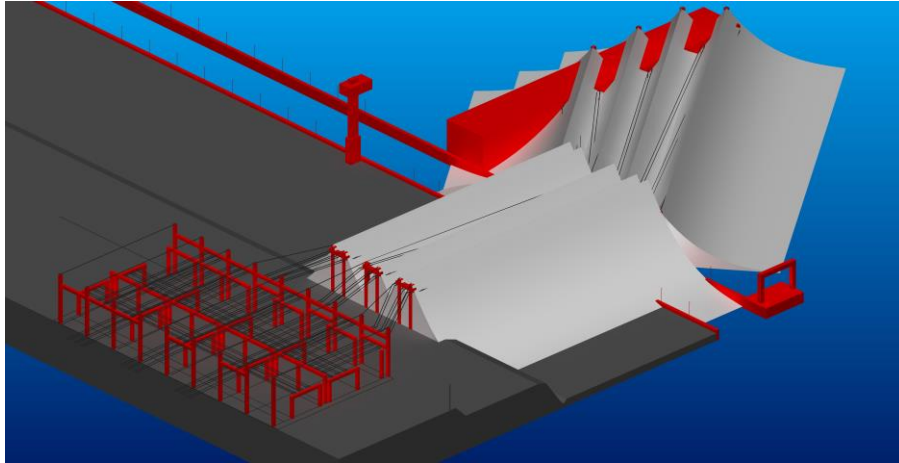
Na slici 7.9 prikazan je renderovan model ostvarene zone zaštite pomoću četiri zaštitna užeta koja povezuju četiri metalna stuba visine 8,2 m na mašinskoj zgradi i portala na brodskoj prevodnici. Nakon iscrtavanja zone zaštite koju ostvaruju četiri zaštitna užeta na mašinskoj zgradi i renderovanja dela objekta HE "Đerdap 1" se može zaključiti da je deo mašinske zgrade delimično zaštićen od atmosferskih pražnjenja kao što je prikazano na slici 7.9.



Slika 7.9: Renderovan model ostvarene zone zaštite na platou mašinske zgrade

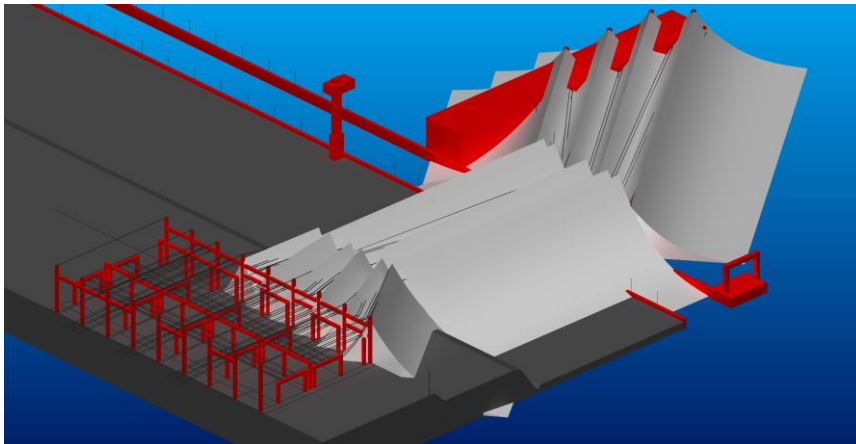
Sa slike 7.9 može se zaključiti i da se tri blok transformatora na platou nalaze potpuno u zoni zaštite koju obezbeđuju zaštitna užad, koja spajaju metalne stubove na krovu mašinske zgrade i pripadajuće dalekovode 400 kV na brodskoj prevodnici. Deo mašinske zgrade ostaje nezaštićen, ali posle adaptacije gromobranske instalacije uz pomoć mreže provodnika, čija je širina okaca 5 m, obezbeđena je potpuna zaštita od atmosferskih pražnjenja.

Zaštitna užad pripadajućih 400 kV dalekovoda, visine 31 m, prostiru se do tri portalna dalekovoda nazivnog napona 400 kV koji se nalaze ispred 400 kV postrojenja. Za iste parametre amplitude struje atmosferskog pražnjenja i istih predloženih izraza za izračunavanje ostvarene zone zaštite pomoću zaštitnih užadi kao na slici 7.8 izvršen je proračun uz uvažavanje još šest zaštitnih užadi. Na slici 7.10 prikazan je renderovan model ostvarene zone zaštite pomoću četiri zaštitna užeta koja povezuju četiri metalna stuba visine 8,2 m na mašinskoj zgradi i četiri portala na brodskoj prevodnici i još šest zaštitnih užadi do portalnih dalekovoda.



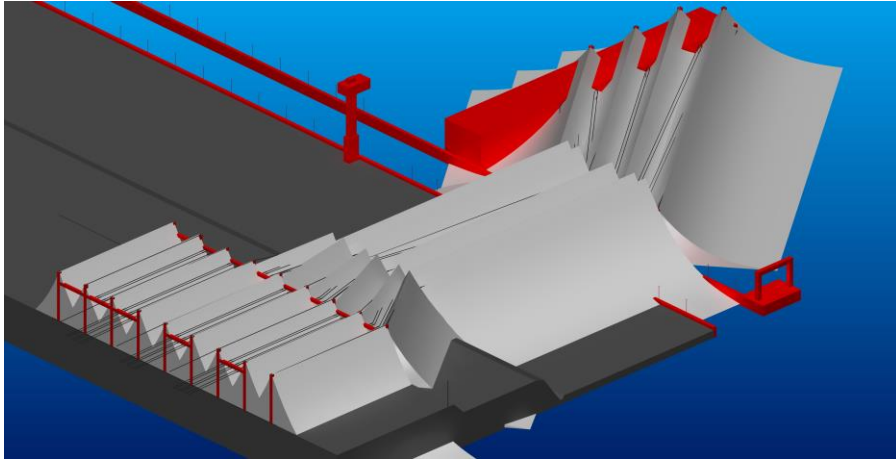
Slika 7.10: Renderovan model ostvarene zone zaštite mašinske zgrade, platoa i portalnih dalekovoda

Dalje se zaštitna užad prostiru do ulaznih portala u postrojenje 400 kV sa dva sistema sabirnica. Korišćeni su isti parametri atmosferskog pražnjenja kao na slici 7.8. Renderovan model ostvarene zone zaštite prikazan je na slici 7.11. Zaštitna užad na ulaznim portalima 400 kV postrojenja nalaze se na visini od 34 m.



Slika 7.11: Renderovan model ostvarene zone zaštite mašinske zgrade, platoa, portalnih dalekovoda i ulaznim portalima u 400 kV postrojenje

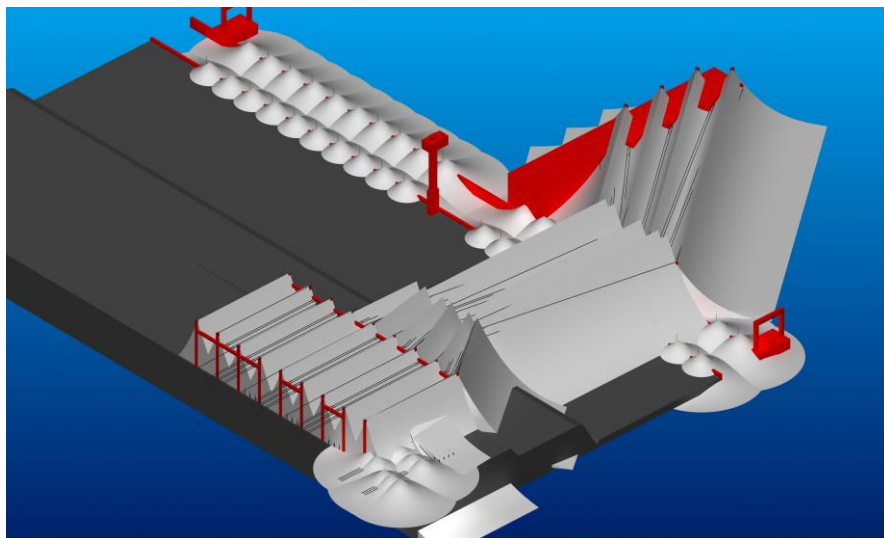
Gromobranska instalacija 400 kV postrojenja je ostvarena pomoću 9 zaštitnih užadi postavljenih između ulaznih portala i izlaznih portala na visini od 34 m. Na slici 7.12 je prikazana ostvarena zona zaštite 400 kV postrojenja HE "Đerdap 1", a bez 110 kV postrojenja, ostvarena pomoću svih zaštitnih užadi.



Slika 7.12: Renderovan model gromobranske zone zaštite HE "Đerdap 1" sa 400 kV postrojenjem, ostvarene sa svim postojećim zaštitnim užadima

Sa slike 7.12 se može zaključiti da se sva visokonaponska oprema koja se nalazi u sklopu HE "Đerdap 1" i postrojenja 400 kV nalazi unutar ostvarene zone zaštite gromobranske instalacije.

Postrojenje 110 kV ima realizovan prihvatni sistem gromobranske zaštite u vidu devet štapnih hvataljki i dva zaštitna užeta. Na slici 7.13 je prikazana celokupna zona zaštite, 400 kV i 110 kV postrojenja ostvarena pomoću svih gromobranskih elemenata. Stubovi za osvetljenje koji se nalaze duž uzvodne i nizvodne prevodnice na visini od 10 m tretiraju se kao štapne hvataljke, ako se analizira prihvatni sistem gromobranske instalacije HE "Đerdap 1".



Slika 7.13: Renderovan model celokupne zone zaštite gromobranske instalacije HE "Đerdap 1"

Generisanjem ulaznih podataka parametara atmosferskog pražnjenja, kao što je prikazano na slici 7.8, i odabiranjem štapne hvataljke (zaštitnog užeta) kao gromobranskog elementa, iscrtan je renderovan model celokupne zone gromobranske zaštite HE "Đerdap 1" sa pripadajućim 400 kV i 110 kV postrojenjima (slika 7.13).

Sa slike 7.13 može se zaključiti da deo mašinske zgrade, komandni toranj kao i uzvodna i nizvodna glava brodske prevodnice jesu nezaštićeni od atmosferskog pražnjenja. Prihvatni sistem dela mašinske zgrade koji ostaje nezaštićen je realizovan pomoću mreže horizontalnih provodnika, trake FeZn 20x3 mm<sup>2</sup> na međusobnom rastojanju od 5 m. Komandni toranj je kompozicija armiranog betona i čelika koji na najvišem delu ima ravan krov ispod kojeg se nalazi terasa sa metalnom ogradom. Objekat je zaštićen od atmosferskih pražnjenja uzemljenom mrežom.

Na komandnom tornju prihvatni provodnik je horizontalni vod, izrađen od FeZn trake preseka 25x4 mm<sup>2</sup> postavljen na ivicu višeg dela u obliku zatvorenog prstena, sa kojeg se spuštaju dva izvoda (od FeZn trake preseka 25x4 mm<sup>2</sup>) postavljenih na nosače zavarene za metalnu ogradu. Metalna ograda na tornju spojena je i sa trećim vodom, koji povezuje metalnu ogradu sa unutrašnjim odvodom.

Na uzvodnoj i nizvodnoj glavi brodske prevodnice nalaze se portalne dizalice sa malim horizontalnim hodom i dizalice za remonta vrata, koje nadvisuju svu opremu na stranama predvodnice. Metalna vrata uronjena su u vodenu masu tako da su gornja i donja glava pokrivene uticajem portalnih dizalica u smislu efikasne zaštite od atmosferskih pražnjenja.

Za procenu pojedinačnih i zbirnih rizika i nastalih šteta od atmosferskog pražnjenja u postrojenje koristi se nadogradnja softverskog alata za vizuelizaciju zone zaštite postrojenja "VN Postrojenja" i naziva se "*Risk management and cost effective by IEC 62305*". Maska softverskog alata "*Risk management and cost effective by IEC 62305*" se prikazuje posle pritiska na dugme "*Risk Management and cost effective*" na slici 7.8.

Popunjavanjem odgovarajućih polja u aplikaciji softverskog alata "*Risk management and cost effective by IEC 62305*" prikazanoj na slici 7.14, 7.15 i 7.16 dobijaju se odgovarajući rezultati za rizike i štete za postrojenje 400 kV "Đerdap 1", HE "Đerdap 1" i postrojenje 110 kV "Đerdap 1" respektivno, koji su prikazani u tabeli 7.1. Deo hidroenergetskog objekta HE "Đerdap 1" koji čini mašinska zgrada i plato sa blok

transformatorima, a bez pripadajućih postrojenja 400 kV i 110 kV se u nastavku disertacije podrazumeva da je HE "Đerdap 1".

**Risk Management and cost effective by IEC-62305-2**

**Određivanje nivoa zaštite**  
 Struja atm. pražnjenja: 200  
 Mapa izokerauničkog nivoa

**Uticaj okoline na VNP**  
 VNP okruženo visokim objektima Cd: 0.25  
 Postojanje blok transformatora Ct: 0.2  
 Seoska okolina Ce: 1

**Proračun broja atm. pražnjenja**  
 $N_D$ : 0.08840468  
 $N_L$ : 0.01768093  
 $N_I$ : 0.07072374  
 Proračun

**Dimenzije VNP**  
 Dužina L(m): 202  
 Širina W(m): 99  
 Visina H(m): 34  
 A: 114070  
 Dodaj  
 Reset

**Pror. odgovarajućih verov. nastalih šteta**  
 Objekat sa gromobranskom zašti P<sub>B</sub>: 0.02  
 Objekat sa gromobranskom zašti P<sub>C</sub>: 0.01

**Pror. odgov. gub. uzrokovanih atmosf. praž.**  
 Postojanje jedne od sledećih r<sub>p</sub>: 0.2  
 Visok r<sub>f</sub>: 0.1  
 L<sub>b</sub>=L<sub>v</sub>: 0.0002  
 L<sub>c</sub>=L<sub>w</sub>=L<sub>z</sub>=L<sub>o</sub>: 0.001

**Procena pojedinačnih rizika**  
 $R_V$ : 0.0000000561930  
 $R_Z$ : 0.0000002809654  
 $R_B$ : 0.0000005619308  
 $R_C$ : 0.000001404627  
 $R_W$ : 0.0000002809654  
 Proračun

**Procena ukupnog rizika**  
 $R_F$ : 0.0000006181238  
 $R_D$ : 0.00000033715848  
 $R_O$ : 0.0000019667578  
 $R_I$ : 0.0000022477232

**Procena isplativosti gromobranske instalacije**  
 Nabavna vrednost objekta C<sub>B</sub>(NJ): 100000  
 Nabavna vrednost opreme u elektrani C<sub>S</sub>(NJ): 300000  
 Nabavna vrednost visokonap. elem. u VNP C<sub>C</sub>(NJ): 100000  
 Nabavna vrednost grom. elemenata C<sub>P</sub>(NJ): 700  
 Ukupni godišnji troškovi održavanj C<sub>PM</sub>(NJ): 70  
 Uneti 0 za štetu bez grom. instalacije i 1 za štetu sa grom. instalacijom  
 Šteta nastala atm. praž. ako ne postoji gromobranska instalacija C<sub>L</sub>(NJ): 1.24  
 Šteta nastala atm. praž. ako postoji gromobranska instalacija C<sub>RL</sub>(NJ): 2.47  
 Ušteda novca na godišnjem nivou upotrebom gromobranske instalacije S(NJ): -71.23  
 Gromobranska instalacija je ekonomski neisplativa  
 Proračun

Slika 7.14: Rizici i štete nastale prilikom atmosferskog pražnjenja u postrojenje 400 kV "Đerdap 1"

U tabeli 7.1 prikazani su i ulazni podaci za procenu rizika kvara od atmosferskog pražnjenja kao i procena šteta nastalih usled atmosferskog pražnjenja u postrojenja, za HE "Đerdap 1", postrojenja 400 kV i 110 kV. Podaci u tabeli 7.1 su dobijeni pomoću izraza predstavljenih u poglavlju 4.3.

Značenja veličina u tabeli 7.1 prikazana su u poglavlju 4.3. Oznaka  $R_{Dmin}$  odnosi se na rizik kada postoji efikasna gromobranska zaštita i njemu je pridružen fuzzy broj  $C=0$  (objašnjeno u potpoglavlju 4.5). Sa  $R_{Dmax}$  označen je rizik pri potpunom odsustvu i gromobranske i prenaponske zaštite. Ovom riziku pridružen je fuzzy broj  $C=1$ . Vrednosti za  $R_{Dmin}$  i  $R_{Dmax}$  generišu se pomoću softverskog alata "Risk management and cost effective by IEC 62305" kada se zadaju odgovarajuće vrednosti za  $P_B$  i  $P_C$  (tabele 4.8 i 4.9, respektivno) bez i sa postojanjem gromobranske zaštite.

Risk Management and cost effective by IEC-62305-2

### Određivanje nivoa zaštite

Struja atm. pražnjenja:

Mapa izokeraoničkog nivoa

### Uticaj okoline na VNP

VNP okruženo objektima ili drveć:  Cd:

Broj transformatora u sklopu VNP:  Ct:

Seoska okolina:  Ce:

### Proračun broja atm. pražnjenja

N<sub>D</sub>:

N<sub>L</sub>:

N<sub>I</sub>:

**Proračun**

### Dimenzije VNP

Dužina L(m):  Dodaj

Širina W(m):  Reset

Visina H(m):  A:

### Pror. odgovarajućih verov. nastalih šteta

Objekat sa gromobranskom zast:  P<sub>B</sub>

Objekat sa gromobranskom zast:  P<sub>C</sub>

### Pror. odgov. gub. uzrokovanih atmosf. praž.

Postojanje jedne od sledećih r:  r<sub>p</sub>

Visok:  r<sub>f</sub>

L<sub>b</sub>=L<sub>v</sub>:  L<sub>c</sub>=L<sub>w</sub>=L<sub>z</sub>=L<sub>o</sub>:

### Procena pojedinačnih rizika

R<sub>V</sub>:  R<sub>Z</sub>:

R<sub>B</sub>:  R<sub>C</sub>:

R<sub>W</sub>:

**Proračun**

### Procena ukupnog rizika

R<sub>F</sub>:  R<sub>D</sub>:

R<sub>O</sub>:  R<sub>I</sub>:

### Procena isplativosti gromobranske instalacije

Nabavna vrednost objekta	C <sub>B</sub> (NJ)	<input type="text" value="200000"/>	Uneti 0 za štetu bez grom. instalacije i 1 za štetu sa grom. instalacijom	<input type="text" value="1"/>
Nabavna vrednost opreme u elektrani	C <sub>S</sub> (NJ)	<input type="text" value="600000"/>	Šteta nastala atm. praž. ako ne postoji gromobranska instalacija	C <sub>L</sub> (NJ) <input type="text" value="219.15"/>
Nabavna vrednost visokonap. elem. u VNP	C <sub>C</sub> (NJ)	<input type="text" value="200000"/>	Šteta nastala atm. praž. ako postoji gromobranska instalacija	C <sub>RL</sub> (NJ) <input type="text" value="2.47"/>
Nabavna vrednost grom. elemenata	C <sub>P</sub> (NJ)	<input type="text" value="1000"/>	Ušteda novca na godišnjem nivou upotrebom gromobranske instalacije	S(NJ) <input type="text" value="116.68"/>
Ukupni godišnji troškovi održavanja gromobranske instalacije	C <sub>PM</sub> (NJ)	<input type="text" value="100"/>	Gromobranska instalacija je ekonomski isplativa	

**Proračun**

Slika 7.15: Rizici i štete nastale prilikom atmosferskog pražnjenja u HE "Đerdap 1"

Shodno algoritmu aproksimativnog rezonovanja za upravljanje rizikom od atmosferskog pražnjenja i postupku fuzzy odlučivanja u proceni  $C$  i  $R_D$  određene su zavisnosti rizika od atmosferskog pražnjenja u odnosu na koeficijent  $C$  (postupak opisan u poglavlju 4.5). Na slici 7.5 prikazan je renderovan model mašinske zgrade, postrojenja 400 kV i 110 kV bez gromobranske instalacije. Ovom slučaju je pridružena vrednost za  $R_{Dmax} = 2,23 \cdot 10^{-4}$  i  $C = 1$ . Renderovani model mašinske zgrade sa gromobranskom instalacijom, a bez gromobranske instalacije postrojenja 400 kV i 110 kV prikazan je na slici 7.9. Za ovaj slučaj potpune gromobranske instalacije mašinske zgrade pridružena je odgovarajuća vrednost za  $R_{Dmin} = 2,24 \cdot 10^{-6}$  i  $C = 0$ . Za konkretan slučaj rezultati za pojedinačne i ukupne rizike prikazani su na slici 7.14 i u tabeli 7.1. Na osnovu prikazanih rezultata proračuna može se zaključiti da potpuna gromobranska instalacija mašinske zgrade dovodi do ispunjenja uslova o tolerantnom riziku od atmosferskog pražnjenja (izraz 4.8 odnosno  $R_{Dmin} < R_T$ ).



Risk Management and cost effective by IEC-62305-2

**Određivanje nivoa zaštite**

Struja atm. pražnjenja

Mapa izokerauničkog nivoa

**Uticaj okoline na VNP**

VNP okruženo objektima ili drveć  Cd: 0.5

Ok transformatora u sklopu VNP  Ct: 0.2

Seoska okolina  Ce: 1

**Proračun broja atm. pražnjenja**

$N_D$

$N_L$

$N_I$

**Proračun**

**Dimenzije VNP**

Dužina L(m)  **Dodaj**

Širina W(m)  **Reset**

Visina H(m)  A

**Pror. odgovarajućih verov. nastalih šteta**

Objekat sa gromobranskom zaš.   $F_B$  0.02

Objekat sa gromobranskom zaš.   $F_C$  0.01

**Pror. odgov. gub. uzrokovanih atmosf. praž.**

Postojanje jedne od sledećih rr   $r_p$  0.2

Visok   $r_f$  0.1

Lb=Lv  Lc=Lw=Lz=Lo

**Procena pojedinačnih rizika**

$R_V$    $R_Z$

$R_B$    $R_C$

$R_W$   **Proračun**

**Procena ukupnog rizika**

$R_F$    $R_D$

$R_O$    $R_I$

**Procena isplativosti gromobranske instalacije**

Nabavna vrednost objekta	$C_B(NJ)$	<input type="text" value="50000"/>	Uneti 0 za štetu bez grom. instalacije i 1 za štetu sa grom. instalacijom Šteta nastala atm. praž. ako ne postoji gromobranska instalacija $C_L(NJ)$ <input type="text" value="13.74"/> Šteta nastala atm. praž. ako postoji gromobranska instalacija $C_{RL}(NJ)$ <input type="text" value="0.15"/> Ušteda novca na godišnjem nivou upotrebom gromobranske instalacije $S(NJ)$ <input type="text" value="3.59"/> Gromobranska instalacija je ekonomski isplativa
Nabavna vrednost opreme u elektrani	$C_S(NJ)$	<input type="text" value="150000"/>	
Nabavna vrednost visokonap. elem. u VNP	$C_C(NJ)$	<input type="text" value="50000"/>	
Nabavna vrednost grom. elemenata	$C_P(NJ)$	<input type="text" value="100"/>	
Ukupni godišnji troškovi održavanja gromobranske instalacije	$C_{PM}(NJ)$	<input type="text" value="10"/>	

**Proračun**

Slika 7.16: Rizici i štete nastale prilikom atmosferskog pražnjenja u postrojenju 110 kV "Đerdap 1"

U nastavku je prikazana uporedna analiza renderovanih modela postrojenja 400 kV bez gromobranske instalacije (slika 7.11) i postrojenja 400 kV sa potpunim prisustvom gromobranske instalacije (slika 7.12). Ovim slučajevima su pridružene odgovarajuće vrednosti za  $R_{Dmax} = 2,12 \cdot 10^{-4}$  i  $C = 1$  odnosno  $R_{Dmin} = 2,12 \cdot 10^{-6}$  i  $C = 0$ , respektivno. Za konkretan slučaj rezultati za pojedinačne i ukupne rizike prikazani su na slici 7.15 i tabeli 7.1.

Konačno, uticaj gromobranske instalacije 110 kV postrojenja može se analizirati upoređenjem renderovanih modela na slikama 7.12 i 7.13. Slika 7.12 odgovara potpunom odsustvu gromobranske instalacije postrojenja 110 kV, čemu je pridružena odgovarajuća vrednost za  $R_{Dmax} = 8,52 \cdot 10^{-5}$  i  $C = 1$ .

Slika 7.13 prikazuje potpuno prisustvo gromobranske instalacije postrojenja 110 kV, čemu je pridružena odgovarajuća vrednost za  $R_{Dmin} = 8,52 \cdot 10^{-8}$  i  $C = 0$ .

Tabela 7.1: Ulazni podaci i odgovarajući rezultati za procenu rizika kvara i šteta od atmosferskog pražnjenja za HE "Đerdap 1", postrojenja 400 kV i 110 kV

<i>Ulazni podaci</i>				<i>Rezultati</i>			
	HE "Đerdap 1"	400 kV "Đerdap 1"	110 kV "Đerdap 1"		HE "Đerdap 1"	400 kV "Đerdap 1"	110 kV "Đerdap 1"
$T_d$	31	31	31	$N_D$	0,14	0,05	0,03
Nivo	I	I	I	$N_L$	0,028	0,05	0,01
$C_d$	0,5	0,25	0,5	$N_I$	0,056	0,19	0,01
$C_t$	0,2	1	0,2	$R_V$	$5,62 \cdot 10^{-8}$	$9,78 \cdot 10^{-8}$	$1,42 \cdot 10^{-8}$
$C_e$	1	1	1	$R_B$	$5,62 \cdot 10^{-7}$	$1,95 \cdot 10^{-7}$	$1,42 \cdot 10^{-7}$
$L$ (m)	220	202	100,8	$R_W$	$2,8 \cdot 10^{-7}$	$4,89 \cdot 10^{-7}$	$7,10 \cdot 10^{-8}$
$W$ (m)	64	99	57,45	$R_Z$	$2,8 \cdot 10^{-7}$	$1,47 \cdot 10^{-7}$	$7,10 \cdot 10^{-8}$
$H$ (m)	30	34	13	$R_C$	$1,4 \cdot 10^{-6}$	$4,89 \cdot 10^{-7}$	$3,55 \cdot 10^{-7}$
$P_B$	0,02	0,02	0,02	$R_F$	$6,2 \cdot 10^{-7}$	$2,93 \cdot 10^{-7}$	$1,56 \cdot 10^{-7}$
$P_C$	0,01	0,01	0,01	$R_O$	$1,97 \cdot 10^{-6}$	$2,44 \cdot 10^{-7}$	$4,97 \cdot 10^{-7}$
$r_p$	0,2	0,2	0,2	$R_{Dmin}$	$3,37 \cdot 10^{-7}$	$5,87 \cdot 10^{-7}$	$8,52 \cdot 10^{-8}$
$r_f$	0,1	0,1	0,1	$R_I$	$2,24 \cdot 10^{-7}$	$2,15 \cdot 10^{-6}$	$5,68 \cdot 10^{-7}$
				$R_{Dmax}$	$3,37 \cdot 10^{-5}$	$5,87 \cdot 10^{-5}$	$8,52 \cdot 10^{-5}$
$C_B$ (NJ)	200000	100000	50000	$C_{PM}$ (NJ)	100	70	10
$C_S$ (NJ)	600000	300000	150000	$C_L$ (NJ)	219,15	83,11	13,85
$C_C$ (NJ)	200000	100000	50000	$C_{RL}$ (NJ)	2,47	0,88	0,16
$C_P$ (NJ)	1000	700	100	$S$ (NJ)	116,68	12,23	3,69

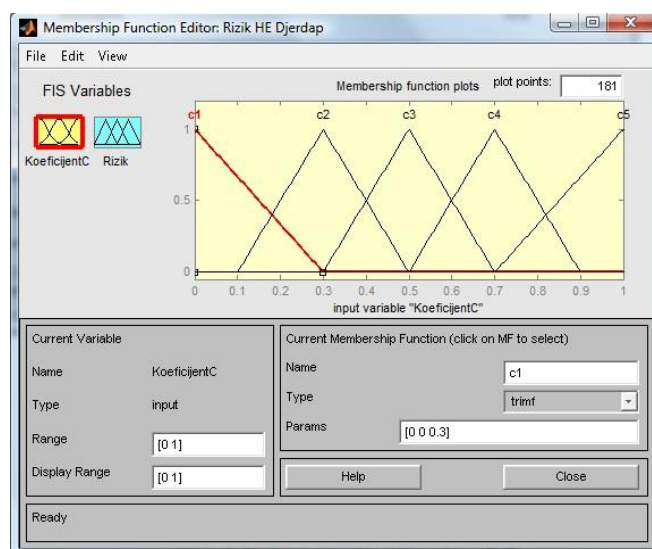
Postojanje gromobranske instalacije u celosti, omogućava ispunjenje uslova dato izrazom 4.8 ( $R_{Dmin} < R_T$ ). Za konkretan slučaj rezultati za pojedinačne i ukupne rizike prikazani su na slici 7.16 i tabeli 7.1.

Iz tabele 7.1 može se zaključiti da za sva tri dela HE "Đerdap 1", postrojenja 400 kV i 110 kV ukupni rizik usled direktnog atmosferskog pražnjenja u postrojenje,  $R_{Dmin}$ , koji predstavlja vrednost rizika usled potpunog prisustva gromobranske instalacije (kada je  $C = 0$ ), zadovoljava tolerantnu vrednost rizika (izraz 4.8).

Kada se posmatraju odgovarajući troškovi u tabeli 7.1 i aplikacijama prikazanim na slikama 7.14, 7.15 i 7.16, može se zaključiti da je za zadate ulazne podatke troškova,

gromobranska instalacija ekonomski isplativa, odnosno da njenim prisustvom dolazi do ostvarenja uštede novca ( $S > 0$ ).

Korišćenjem fuzzy logike mogu se analizirati vrednosti rizika u odnosu na ostvarenu zonu zaštite kao što je objašnjeno u poglavlju 4.5. Ako se posmatra HE "Đerdap 1" sa vrednostima za  $R_{Dmax} = 3,37 \cdot 10^{-5}$  za  $C = 1$  i  $R_{Dmin} = 3,37 \cdot 10^{-7}$  za  $C = 0$  (vrednosti prikazane u tabeli 7.1) može se dobiti vrednost za koeficijent  $C$  kada je  $R_D = R_T$  (tolerantnom riziku). Fuzzy skup  $C$  predstavlja ulazni podatak u fuzzy regulator, analiziran u softverskom alatu "Fuzzy Logic Toolbox – Matlab", koji je prikazan sa odgovarajućim funkcijama pripadnosti kao na slici 7.17.



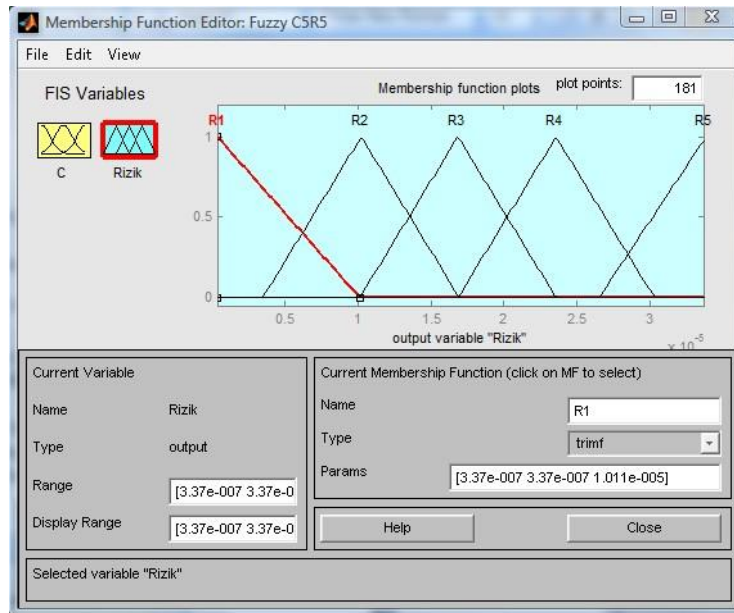
Slika 7.17: Funkcije pripadnosti fuzzy broja  $C$  za HE "Đerdap 1"

Rizik  $R_D$  predstavljen je kao izlaz iz fuzzy regulatora sa odgovarajućim funkcijama pripadnosti (slika 7.18). Granične vrednosti rizika  $R_{Dmin}$  i  $R_{Dmax}$  dobijene pomoću softverskog alata "Risk management and cost effective by IEC 62305" definišu opseg funkcija pripadnosti za  $R_D$  kao što je prikazano na slici 7.18.

Na osnovu proračunatih vrednosti rizika za HE "Đerdap 1" moguće je definisati značenja vrednosti skupova  $C$  i  $R_D$  [68] kao što je prikazano u poglavlju 4.5:

Analitički izrazi funkcija pripadnosti  $C$  i  $R_D$  formiraju se po uzoru na tabelu 4.17, za prethodno definisan opseg za rizik i funkcije pripadnosti za HE "Đerdap 1".

Algoritam aproksimativnog rezonovanja za procenu rizika od atmosferskog pražnjenja, razvijen za određivanje rizika kvara kod postrojenja, sastoji se od 5 pravila [65]:



Slika 7.18: Funkcije pripadnosti rizika  $R_D$  za HE "Đerdap 1"

*Pravilo 1:* Ako je veoma dobro izvedena gromobranska instalacija, što znači da je 80 – 100% objekta (crveni deo) u zoni zaštite (sivi deo) na slikama 7.9, 7.10, 7.11, 7.12 i 7.13 tada je vrednost rizika od atmosferskog pražnjenja, za izvor oštećenja koji karakteriše atmosfersko pražnjenje u samo postrojenje ( $R_D$ ), veoma mala;

*Pravilo 2:* Ako je dobro izvedena gromobranska instalacija, što znači da je 60 – 80% objekta (crveni deo) u zoni zaštite (sivi deo) na slikama 7.9, 7.10, 7.11, 7.12 i 7.13, tada je vrednost rizika od atmosferskog pražnjenja, za izvor oštećenja koji karakteriše atmosfersko pražnjenje u samo postrojenje ( $R_D$ ), mala;

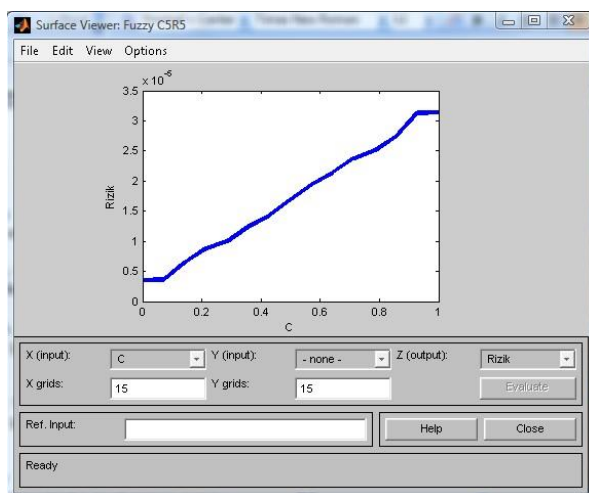
*Pravilo 3:* Ako je srednje izvedena gromobranska instalacija, što znači da je 40 – 60% objekta (crveni deo) u zoni zaštite (sivi deo) na slikama 7.9, 7.10, 7.11, 7.12 i 7.13, tada je vrednost rizika od atmosferskog pražnjenja, za izvor oštećenja koji karakteriše atmosfersko pražnjenje u samo postrojenje ( $R_D$ ), srednja;

*Pravilo 4:* Ako je slabo izvedena gromobranska instalacija, što znači da je 20 – 40% objekta (crveni deo) u zoni zaštite (sivi deo) na slikama 7.9, 7.10, 7.11, 7.12 i 7.13, tada je vrednost rizika od atmosferskog pražnjenja, za izvor oštećenja koji karakteriše atmosfersko pražnjenje u samo postrojenje ( $R_D$ ), velika;

*Pravilo 5:* Ako je veoma slabo izvedena gromobranska instalacija, što znači da je 0 – 20% objekta (crveni deo) u zoni zaštite (sivi deo) na slikama 7.9, 7.10, 7.11, 7.12

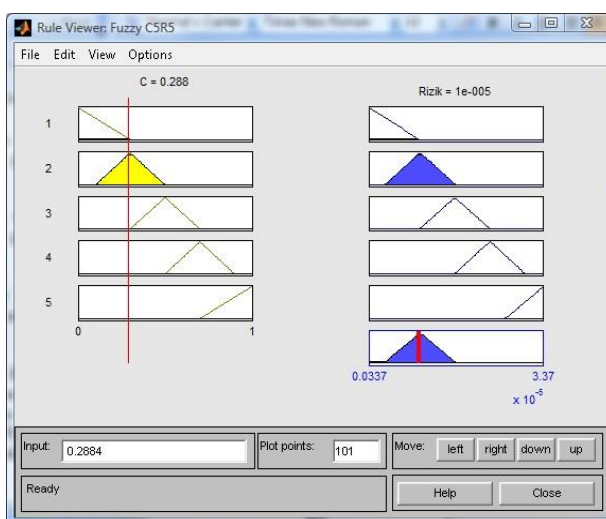
i 7.13, tada je vrednost rizika od atmosferskog pražnjenja, za izvor oštećenja koji karakteriše atmosfersko pražnjenje u samo postrojenje ( $R_D$ ), veoma velika.

Primenjujući fuzzy odlučivanje dobija se zavisnost rizika  $R_D$  u funkciji koeficijenta  $C$  (slika 7.19). Algoritam aproksimativnog rezonovanja čini skup svih pravila u proceni rizika kvara od atmosferskog pražnjenja u postrojenje, a može se grafički predstaviti primenom softverskog alata "Fuzzy Logic Toolbox – Matlab" (slika 7.20). Na ovaj način moguće je za veliki broj zadatih vrednosti za  $C$  procenjivati rizike od atmosferskog pražnjenja kao što je prikazano na slici 7.20 [65].



Slika 7.19: Zavisnost rizika  $R_D$  za HE "Đerdap 1" od koeficijenta  $C$

Na slici 7.20 je prikazan postupak za dobijanje granične vrednosti fuzzy broja  $C$  koji odgovara graničnoj vrednosti tolerantnog rizika za  $R_D$  (izraz 4.8).



Slika 7.20: Prikaz dobijenih vrednosti  $R_D$  za HE "Đerdap 1" u zavisnosti od  $C$

Sa slike 7.20 se može zaključiti da je za meru izvedene gromobranske instalacije koja se može opisati vrednošću  $C = 0,2884$  procenjena vrednost rizika od direktnog atmosferskog pražnjenja,  $R_D = 10^{-5}$ , koja predstavlja graničnu vrednost za dozvoljeni rizik od direktnog atmosferskog pražnjenja (izraz 4.8). Za sve vrednosti  $C$  koje su manje od 0,2884,  $R_D$  je u granicama koji se toleriše prema [1], dok je za sve vrednosti  $C$  koje su veće od vrednosti 0,2884  $R_D$  neprihvatljiv sa stanovišta [1] odnosno nije zadovoljen uslov dat izrazom (4.8).

U tabeli 7.2 prikazane su vrednosti ukupnog rizika  $R_D$  u funkciji zadatih vrednosti za  $C$  dobijenih primenom softverskog alata "*Fuzzy Logic Toolbox – Matlab*" [63]. Vrednosti za  $C$  su zadate od vrednosti 0 (kada je 100% efikasna gromobranska instalacija) do vrednosti 1 (kada nije realizovana gromobranska instalacija) sa korakom od 0,08. Na osnovu grafika prikazanog na slici 7.20 i podataka iz tabele 7.2 može se zaključiti da je za meru gromobranske instalacije koja je opisana sa  $C = 0$ , (što bi značilo da je najbolje moguće izvedena gromobranska instalacija), procenjena vrednost rizika od atmosferskog pražnjenja predstavljena sa  $R_D = 3,49 \cdot 10^{-6}$ , što zadovoljava uslov dat izrazom (4.8).

Tabela 7.2: Zavisnost rizika  $R_D$  u funkciji koeficijenta  $C$  za HE "Đerdap 1"

$C$	$R_D$	$C$	$R_D$
0	$3,49 \cdot 10^{-6}$	0,56	$1,91 \cdot 10^{-5}$
0,08	$3,69 \cdot 10^{-6}$	0,64	$2,13 \cdot 10^{-5}$
0,16	$7,21 \cdot 10^{-6}$	0,72	$2,39 \cdot 10^{-5}$
0,24	$9,29 \cdot 10^{-6}$	0,8	$2,54 \cdot 10^{-5}$
0,32	$1,11 \cdot 10^{-5}$	0,88	$2,9 \cdot 10^{-5}$
0,4	$1,35 \cdot 10^{-5}$	0,96	$3,14 \cdot 10^{-5}$
0,48	$1,6 \cdot 10^{-5}$	1	$3,14 \cdot 10^{-5}$

Ovaj zaključak verno opisuje realno stanje s obzirom da ne postoji 100% gromobranska zaštita, odnosno uvek postoji rizik da će atmosfersko pražnjenje izazvati oštećenje dela postrojenja. Za meru gromobranske instalacije koja je opisana sa  $C = 1$ , (što bi značilo da ne postoji gromobranska instalacija), procenjena vrednost rizika od atmosferskog pražnjenja predstavljena je sa  $R_D = 3,14 \cdot 10^{-5}$ . Ova vrednost rizika  $R_D$  ne zadovoljava uslov dat izrazom (4.8). Procenjena vrednost rizika  $R_D$  odgovara najvećem mogućem riziku, što je u skladu sa pretpostavkom o nepostojanju gromobranske instalacije.

Primenom softverskog alata za 3D prikaz zone zaštite gromobranske instalacije postrojenja [39] "VN Postrojenja" i odgovarajućih tehnika rada u AutoCAD-u [53] određene su zone zaštite gromobranske instalacije mašinske zgrade HE "Đerdap 1" u funkciji broja primenjenih gromobranskih elemenata, odnosno zaštitnih užadi (slika 7.9). Rezultati su dobijeni za struju atmosferskog pražnjenja od 33 kA i za izraz poluprečnika zone zaštite koji je predložen od strane autora Young [3]. Ako se pretpostavi da je ostvarena maksimalna zona zaštite gromobranske instalacije izvedena pomoću 4 zaštitna užeta, broju  $C$  može se dodeliti minimalna vrednost. Za gromobransku instalaciju izvedenu sa 1, 2, 3 ili 4 užeta može se zaključiti da je izvedena sa odgovarajućim brojem  $C$  kome se pridružuju vrednosti 0,75; 0,5; 0,25 i 0, respektivno. Vrednosti za  $C$  su dobijene polazeći od pretpostavke da je sa 4 zaštitna užeta ostvarena maksimalna zona zaštite i dodeljena vrednost  $C = 0$  (slika 7.9). Sa 3 zaštitna užeta ostvarena je zona zaštite od 75 % , što odgovara  $C = 0,25$ . Sa 2 zaštitna užeta ostvarena je zona zaštite od 50 % , što odgovara broju  $C = 0,5$ . Unošenjem navedenih vrednosti za broj  $C$  u softverski alat "Fuzzy Logic Toolbox – Matlab" dobijaju se odgovarajuće vrednosti za rizik  $R_D$ . Upotrebom fuzzy logike dobijene su vrednosti za rizik  $R_D$  u funkciji broja gromobranskih elemenata i rezultati prikazani u tabeli 7.3.

Tabela 7.3: Zavisnost rizika  $R_D$  od broja gromobranskih elemenata

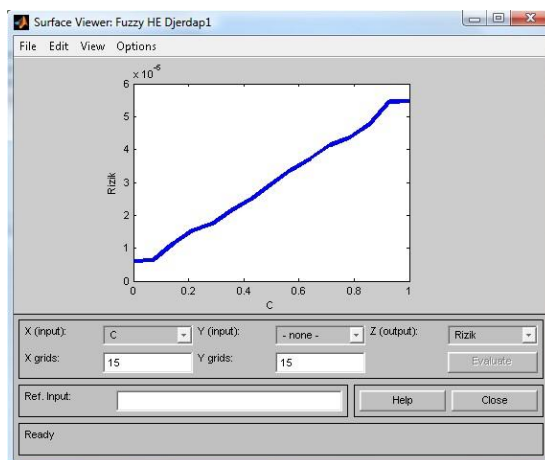
<b>Broj zaštitnih užadi</b>	<b><math>C</math></b>	<b><math>R_D</math></b>
1	0,75	$2,44 \cdot 10^{-5}$
2	0,50	$1,69 \cdot 10^{-5}$
3	0,25	$9,46 \cdot 10^{-6}$
4	0,00	$3,49 \cdot 10^{-6}$

Na osnovu rezultata datih u tabeli 7.3 i prikaza sa slike 7.9 može se zaključiti da je sa aspekta rizika od direktnog atmosferskog pražnjenja  $R_D$ , rizik u dozvoljenim granicama, odnosno zadovoljava izraz (4.8), u slučajevima kada su upotrebljena 3 ili 4 zaštitna užeta za realizaciju gromobranske instalacije. Međutim sa aspekta ostvarene zone zaštite ne bi bila adekvatno realizovana gromobranska instalacija, jer bi deo mašinske zgrade bio nezaštićen ako bi bila upotrebljena 3 zaštitna užeta. Da bi prihvatni sistem gromobranske instalacije bio što efikasniji moraju biti zadovoljena oba uslova: uslov tolerantnog nivoa rizika i uslov vizuelizacije zone zaštite u odnosu na štice visokonaponske elemente. Dakle prihvatni sistem HE "Đerdap 1" je efikasno realizovan

samo sa 4 zaštitna užeta. Izvedena gromobranska instalacija koja je opisana brojem  $C = 0,2884$  (slika 7.20) i predstavlja graničnu vrednost za koju je  $R_D$  u tolerantnim granicama može se pridružiti opis prihvatnog sistema gromobranske instalacije u vidu 3 zaštitna užeta prema tabeli 7.3. Kao što je već zaključeno opisani slučaj nije prihvatljiv sa stanovišta ostvarene zone zaštite gromobranske instalacije.

Ako se posmatra postrojenje 400 kV HE "Đerdap 1" sa vrednostima za  $R_{Dmax} = 5,87 \cdot 10^{-5}$  za  $C = 1$  i  $R_{Dmin} = 5,87 \cdot 10^{-7}$  za  $C = 0$  (tabela 7.1) može se dobiti vrednost za koeficijent  $C$  kada je  $R_D = R_T$  (tolerantnom riziku, izraz (4.8)). Kao i za primer HE "Đerdap 1", vrednost  $C$  predstavlja ulazni podatak u fuzzy regulator analiziran u softverskom alatu "Fuzzy Logic Toolbox – Matlab" i prikazan sa odgovarajućim funkcijama pripadnosti kao na slici 7.17. Rizik  $R_D$  predstavljen je kao izlaz iz fuzzy regulatora sa odgovarajućim funkcijama pripadnosti (slika 7.18). Granične vrednosti rizika  $R_{Dmin}$  i  $R_{Dmax}$  dobijene pomoću softverskog alata "Risk management and cost effective by IEC 62305" definišu opseg funkcija pripadnosti za  $R_D$  slično kao što je prikazano na slici 7.18. Jedina razlika, u odnosu na primer za HE "Đerdap 1", je u tome što su granične vrednosti za  $R_D$  odgovarajuće za primer postrojenja 400 kV (tabela 7.1)

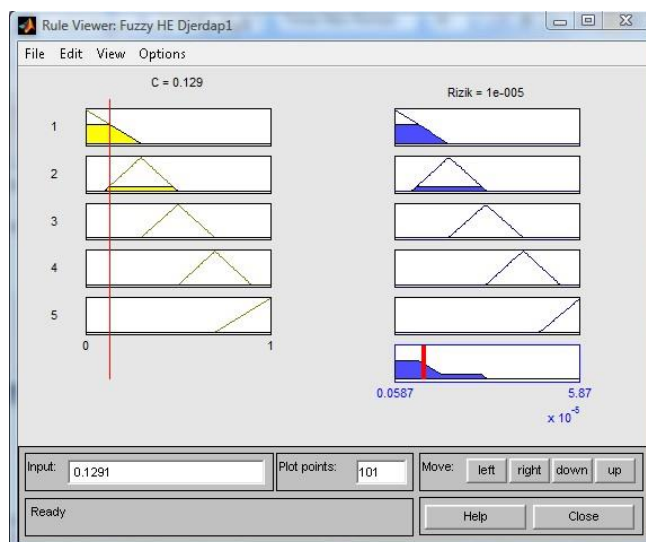
Primenjujući fuzzy odlučivanje dobija se zavisnost rizika  $R_D$  u funkciji koeficijenta  $C$  (slika 7.21). Algoritam aproksimativnog rezonovanja čini skup svih pravila u proceni rizika kvara od atmosferskog pražnjenja u postrojenje, a može se grafički predstaviti primenom softverskog alata "Fuzzy Logic Toolbox – Matlab" (slika 7.22). Na ovaj način moguće je za veliki broj zadatih vrednosti za  $C$  procenjivati rizike od atmosferskog pražnjenja kao što je prikazano na slici 7.22 [65].



Slika 7.21: Zavisnost rizika  $R_D$  za postrojenje 400 kV HE "Đerdap 1" od  $C$



Na slici 7.22 je prikazan postupak za dobijanje granične vrednosti broja  $C$  koji odgovara vrednosti tolerantnog rizika za  $R_D$  (izraz (4.8)) za postrojenje 400 kV HE "Đerdap 1".



Slika 7.22: Prikaz dobijenih vrednosti za  $R_D$ , za postrojenja 400 kV HE "Đerdap 1" u zavisnosti od  $C$

Sa slike 7.22 se može zaključiti da je za meru izvedene gromobranske instalacije koja se može opisati sa  $C = 0,129$  procenjena vrednost rizika od direktnog atmosferskog pražnjenja  $R_D = 10^{-5}$  što predstavlja graničnu vrednost za dozvoljeni rizik od direktnog atmosferskog pražnjenja (izraz (4.8)). Za sve vrednosti  $C$  koje su manje od 0,129,  $R_D$  je u granicama koji se toleriše prema [1], dok je za sve vrednosti  $C$  koje su veće od vrednosti 0,129 vrednost  $R_D$  neprihvatljiva sa stanovišta [1]. U drugom slučaju nije zadovoljen uslov dat izrazom (4.8).

U tabeli 7.4 prikazane su vrednosti ukupnog rizika  $R_D$  u funkciji zadatih vrednosti za  $C$  dobijenih primenom softverskog alata "*Fuzzy Logic Toolbox – Matlab*" [65]. Vrednost  $C$  je zadata od vrednosti 0 (kada je 100% efikasna gromobranska instalacija) do vrednosti 1 (kada nema gromobranske instalacije) sa korakom od 0,08.

Na osnovu grafika prikazanog na slici 7.22 i podataka iz tabele 7.4 može se zaključiti da je za meru kvaliteta gromobranske instalacije koja je opisana sa  $C = 0$  presudan kriterijum procenjene vrednosti rizika. To bi značilo da je najbolje moguće izvedena gromobranska instalacija za procenjenu vrednost rizika od direktnog atmosferskog pražnjenja  $R_D = 6,07 \cdot 10^{-6}$ , što zadovoljava uslov dat izrazom (4.8).

Tabela 7.4: Zavisnost rizika  $R_D$  u funkciji  $C$  za postrojenje 400 kV HE "Đerdap 1"

$C$	$R_D$	$C$	$R_D$
0	$6,07 \cdot 10^{-6}$	0,56	$3,33 \cdot 10^{-5}$
0,08	$6,42 \cdot 10^{-6}$	0,64	$3,72 \cdot 10^{-5}$
0,16	$1,26 \cdot 10^{-5}$	0,72	$4,16 \cdot 10^{-5}$
0,24	$1,62 \cdot 10^{-5}$	0,8	$4,43 \cdot 10^{-5}$
0,32	$1,93 \cdot 10^{-5}$	0,88	$5,04 \cdot 10^{-5}$
0,4	$2,36 \cdot 10^{-5}$	0,96	$5,47 \cdot 10^{-5}$
0,48	$2,78 \cdot 10^{-5}$	1	$5,47 \cdot 10^{-5}$

Ovaj zaključak verno opisuje realno stanje s obzirom da ne postoji 100% gromobranska zaštita odnosno uvek postoji rizik da će atmosfersko pražnjenje izazvati oštećenje dela postrojenja. Za meru gromobranske instalacije koja je opisana sa  $C = 1$ , što bi značilo da ne postoji gromobranska instalacija, procenjena vrednost rizika od atmosferskog pražnjenja je  $R_D = 5,47 \cdot 10^{-5}$ . Ova vrednost rizika  $R_D$  ne zadovoljava uslov dat izrazom (4.8). Procenjena vrednost rizika  $R_D$  odgovara najvećem mogućem riziku, što je u skladu sa pretpostavkom o nepostojanju gromobranske instalacije.

Primenom softverskog alata za 3D prikaz zone zaštite gromobranske instalacije postrojenja [39] "VN Postrojenja" i odgovarajućih postupaka i tehnika u AutoCAD-u [53] određene su zone zaštite gromobranske instalacije postrojenja 400 kV u funkciji broja primenjenih zaštitnih užadi (slika 7.12). Zona zaštite je realizovana za struju atmosferskog pražnjenja od 33 kA dok je izraz širine zone zaštite predložen od strane autora Young [3]. Ako se pretpostavi da je, u vizuelnom smislu, najkompletnija gromobranska instalacija izvedena pomoću 9 zaštitnih užadi, broju  $C$  može se dodeliti minimalna vrednost.

Za gromobransku instalaciju realizovanu sa 1, 2,... i/ili 9 zaštitnih užadi mogu se pridružiti odgovarajući brojevi  $C$  sa vrednostima 0,88; 0,77; 0,66,... i 0, respektivno. Vrednosti za  $C$  su dobijene polazeći od pretpostavke da je sa 9 zaštitnih užadi ostvarena maksimalna zona zaštite i dodeljena vrednost  $C = 0$  (slika 7.12). Sa 8 zaštitnih užadi ostvarena je zona zaštite od 88,89 % , što odgovara  $C = 0,11$ . Sa 7 zaštitnih užadi ostvarena je zona zaštite od 77,78 % , što odgovara  $C = 0,22$ . Sa 6 zaštitnih užadi ostvarena je zona zaštite od 66,67 % , što odgovara  $C = 0,33$ ...

Unošenjem navedenih vrednosti za  $C$  u softverski alat "Fuzzy Logic Toolbox – Matlab" sa prethodno zadatim granicama za  $R_D$ , kao što je prikazano na slici 7.22,

dobijaju se odgovarajuće vrednosti za rizik  $R_D$ . Upotrebom fuzzy logike dobijene su vrednosti za rizik  $R_D$  u funkciji broja gromobranskih elemenata (tabela 7.5).

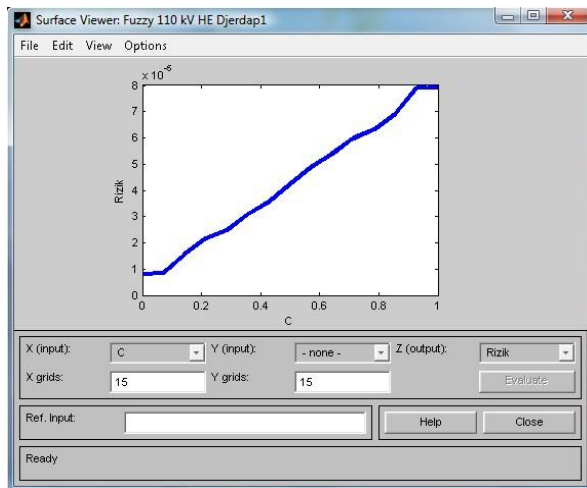
Tabela 7.5 Zavisnost rizika  $R_D$  od broja gromobranskih elemenata

<b>Broj zaštitnih užadi</b>	<b><math>C</math></b>	<b><math>R_D</math></b>
1	0,88	$5,04 \cdot 10^{-5}$
2	0,77	$4,31 \cdot 10^{-5}$
3	0,66	$3,83 \cdot 10^{-5}$
4	0,55	$3,27 \cdot 10^{-5}$
5	0,44	$2,55 \cdot 10^{-5}$
6	0,33	$2 \cdot 10^{-5}$
7	0,22	$1,55 \cdot 10^{-5}$
8	0,11	$7,89 \cdot 10^{-6}$
9	0	$6,76 \cdot 10^{-6}$

Na osnovu rezultata datih u tabeli 7.5 i prikaza sa slike 7.22 može se zaključiti da je sa aspekta rizika od direktnog atmosferskog pražnjenja, rizik u dozvoljenim granicama, odnosno zadovoljava izraz (4.8), u slučajevima kada je upotrebljeno 8 ili 9 zaštitnih užadi, kao prihvatni sistem gromobranske instalacije. Sa aspekta dozvoljenih rizika, a primenom fuzzy logike u procenjivanju rizika u odnosu na broj gromobranskih elemenata, može se zaključiti (tabela 7.5) da je gromobranska zaštita ostvarena pomoću 8 zaštitnih užadi efikasna. Međutim sa aspekta ostvarene zone zaštite (slika 7.12) vidi se da tada jedan deo postrojenja 400 kV "Đerdap 1" ostaje nezaštićen. Može se zaključiti da samo oba kriterijuma (i kriterijum rizika i kriterijum ostvarene zone zaštite) daju najefikasniju zaštitu od atmosferskih pražnjenja u postrojenje.

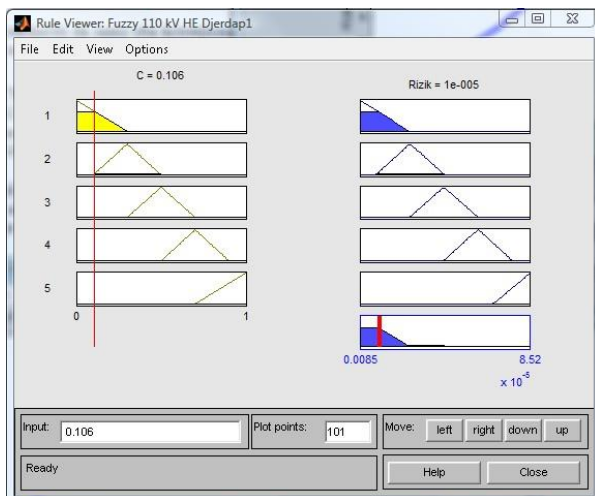
Ako se posmatra postrojenje 110 kV "HE Đerdap 1" sa vrednostima za  $R_{Dmax} = 8,52 \cdot 10^{-5}$  za  $C = 1$  i  $R_{Dmin} = 8,52 \cdot 10^{-8}$  za  $C = 0$  mogu se primenom fuzzy logike dobiti rezultati koji se nalaze unutar ovog intervala, odnosno može se dobiti granična vrednost za koeficijent  $C$  kada je  $R_D = R_T$  (tolerantnom riziku  $10^{-5}$ , izraz (4.8)). Kao i za primer HE "Đerdap 1" vrednost  $C$  predstavlja ulazni podatak u fuzzy regulator analiziran u softverskom alatu "Fuzzy Logic Toolbox – Matlab" i prikazan sa odgovarajućim funkcijama pripadnosti kao na slici 7.17. Rizik  $R_D$  predstavljen je kao izlaz iz fuzzy regulatora sa odgovarajućim funkcijama pripadnosti (slika 7.18). Granične vrednosti rizika  $R_{Dmin}$  i  $R_{Dmax}$  dobijene pomoću softverskog alata "Risk management and cost effective by IEC 62305" definišu opseg funkcija pripadnosti za  $R_D$  slično kao što je

prikazano na slici 7.18. Jedina razlika, u odnosu na primer za HE "Đerdap 1", je u tome što su granične vrednosti za  $R_D$  odgovarajuće za primer postrojenja 110 kV (tabela 7.1). Primenjujući fuzzy odlučivanje dobija se zavisnost rizika  $R_D$  u funkciji koeficijenta  $C$  (slika 7.23).



Slika 7.23: Zavisnost rizika  $R_D$  za postrojenje 110 kV HE "Đerdap 1" od  $C$

Algoritam aproksimativnog rezonovanja čini skup svih pravila u proceni rizika kvara od atmosferskog pražnjenja u postrojenje, a može se grafički predstaviti primenom softverskog alata "*Fuzzy Logic Toolbox – Matlab*" (slika 7.24). Na ovaj način moguće je za veliki broj zadatih vrednosti za  $C$  procenjivati rizike od atmosferskog pražnjenja kao što je prikazano na slici 7.24 [65]. Na slici 7.24 je prikazan postupak dobijanje granične vrednosti  $C$  koji odgovara vrednosti tolerantnog rizika za  $R_D$  (izraz (4.8)) za postrojenje 110 kV HE "Đerdap 1".



Slika 7.24: Prikaz rizika  $R_D$ , za postrojenje 400 kV HE "Đerdap 1" u zavisnosti od  $C$

Sa slike 7.24 se može zaključiti da je za meru kvaliteta izvedene gromobranske instalacije koja se može opisati sa  $C = 0,106$  procenjena vrednost rizika od direktnog atmosferskog pražnjenja  $R_D = 10^{-5}$  koja predstavlja graničnu vrednost za dozvoljeni rizik od direktnog atmosferskog pražnjenja (izraz (4.8)). Sve vrednosti za  $C$  koje su manje od 0,106, rizik od direktnog atmosferskog pražnjenja  $R_D$  je u granicama koji se toleriše prema [1], dok je za sve vrednosti za  $C$  koje su veće od vrednosti 0,106 vrednost rizika od direktnog atmosferskog pražnjenja  $R_D$  neprihvatljiv sa stanovišta [1] odnosno nije zadovoljen uslov dat izrazom (4.8).

U tabeli 7.6 prikazane su vrednosti ukupnog rizika  $R_D$  u funkciji zadatih vrednosti za  $C$  dobijenih primenom softverskog alata "*Fuzzy Logic Toolbox – Matlab*" [65]. Za  $C$  je zadata vrednost od 0 (kada je 100 % realizovana zona zaštite gromobranske instalacija) do vrednosti 1 (kada nema gromobranske instalacije) sa korakom od 0,08.

Tabela 7.6: Zavisnost rizika  $R_D$  u funkciji  $C$  za postrojenje 110 kV HE "Đerdap 1"

$C$	$R_D$	$C$	$R_D$
0	$8,12 \cdot 10^{-6}$	0,56	$4,8 \cdot 10^{-5}$
0,08	$8,63 \cdot 10^{-6}$	0,64	$5,37 \cdot 10^{-5}$
0,16	$1,76 \cdot 10^{-5}$	0,72	$6,02 \cdot 10^{-5}$
0,24	$2,29 \cdot 10^{-5}$	0,8	$6,41 \cdot 10^{-5}$
0,32	$2,75 \cdot 10^{-5}$	0,88	$7,31 \cdot 10^{-5}$
0,4	$3,37 \cdot 10^{-5}$	0,96	$7,93 \cdot 10^{-5}$
0,48	$4 \cdot 10^{-5}$	1	$7,94 \cdot 10^{-5}$

Na osnovu grafika prikazanog na slici 7.24 i podataka iz tabele 7.6 može se zaključiti da je za meru kvaliteta gromobranske instalacije koja je opisana sa  $C = 0$  presudan kriterijum procenjene vrednosti rizika. To bi značilo da je najbolje moguće izvedena gromobranska instalacija za procenjenju vrednost rizika od direktnog atmosferskog pražnjenja  $R_D = 8,12 \cdot 10^{-6}$ , što zadovoljava uslov dat izrazom (4.8). Ovaj zaključak verno opisuje realno stanje s obzirom da ne postoji 100% gromobranska zaštita, odnosno uvek postoji rizik da će atmosfersko pražnjenje izazvati oštećenje dela postrojenja.

Za meru gromobranske instalacije koja je opisana sa  $C = 1$ , što bi značilo da ne postoji gromobranska instalacija, procenjena vrednost rizika od atmosferskog pražnjenja predstavljena je sa  $R_D = 7,94 \cdot 10^{-5}$ . Ova vrednost rizika  $R_D$  ne zadovoljava uslov dat

izrazom (4.8). U tom slučaju procenjena vrednost rizika  $R_D$  odgovara najvećem mogućem riziku, što je u skladu sa pretpostavkom o nepostojanju gromobranske instalacije.

Primenom softverskog alata za 3D prikaz zone zaštite gromobranske instalacije postrojenja [39] "*VN Postrojenja*" i odgovarajućih postupaka i tehnika u AutoCAD-u [53] određene su zone zaštite gromobranske instalacije u funkciji broja primenjenih zaštitnih užadi i štapnih hvataljki (slika 7.13). Rezultati su dobijeni za struju atmosferskog pražnjenja od 33 kA i za izraz poluprečnika (širine) zone zaštite koji je predložen od strane autora Young [3].

Ako se pretpostavi da je, u vizuelnom smislu, najkompletnija gromobranska instalacija realizovana pomoću devet štapnih hvataljki i dva zaštitna užeta, vrednosti  $C$  može se dodeliti minimalna vrednost. Za gromobransku instalaciju izvedenu sa 1, 2,... i 9 štapnih hvataljki i 2 zaštitna užeta može se zaključiti da je izvedena sa odgovarajućim vrednostima za  $C$ : 0,887; 0,796; 0,705; 0,614... i 0, respektivno.

Vrednosti za  $C$  su dobijene polazeći od pretpostavke da je sa 9 štapnih hvataljki i 2 zaštitna užeta ostvarena maksimalna zona zaštite i dodeljena vrednost  $C = 0$  (slika 7.13). Sa osam štapnih hvataljki i dva zaštitna užeta ostvarena je zona zaštite od 91 %, što odgovara  $C = 0,083$ . Sa sedam štapnih hvataljki i dva zaštitna užeta ostvarena je zona zaštite od 81,9 % , što odgovara  $C = 0,167$ . Sa šest štapnih hvataljki i dva zaštitna užeta ostvarena je zona zaštite od 72,8 % , što odgovara  $C = 0,2496$ .

Unošenjem navedenih vrednosti za  $C$  u softverski alat "*Fuzzy Logic Toolbox – Matlab*", koji je formiran na osnovu podataka konkretnog 110 kV postrojenja, dobijaju se odgovarajuće vrednosti za rizik  $R_D$ . Upotrebom fuzzy logike dobijene su vrednosti za rizik  $R_D$  u funkciji broja gromobranskih elemenata (tabela 7.7).

Na osnovu rezultata datih u tabeli 7.7 i prikaza sa slike 7.24 može se zaključiti da je rizik  $R_D$  u dozvoljenim granicama, odnosno zadovoljava izraz (4.8), u slučajevima kada je realizovan prihvatni sistem gromobranske instalacije upotrebom osam ili devet štapnih hvataljki i dva zaštitna užeta.

Sa aspekta dozvoljenih rizika, a primenom fuzzy logike u procenjivanju rizika u odnosu na broj gromobranskih elemenata, može se zaključiti da je gromobranska zaštita ostvarena pomoću osam štapnih hvataljki i dva zaštitna užeta, efikasna.

Tabela 7.7: Zavisnost rizika  $R_D$  od broja gromobranskih elemenata

<b>Broj gromobranskih elemenata</b>	<b>C</b>	<b><math>R_D</math></b>
1 zaštitno uže	0,887	$7,48 \cdot 10^{-5}$
2 zaštitna užeta	0,796	$6,39 \cdot 10^{-5}$
1 štapna hvataljka i 2 zaštitna užeta	0,705	$5,96 \cdot 10^{-5}$
2 štapne hvataljke i 2 zaštitna užeta	0,614	$5,18 \cdot 10^{-5}$
3 štapne hvataljke i 2 zaštitna užeta	0,523	$4,48 \cdot 10^{-5}$
4 štapne hvataljke i 2 zaštitna užeta	0,432	$3,6 \cdot 10^{-5}$
5 štapnih hvataljki i 2 zaštitna užeta	0,341	$2,94 \cdot 10^{-5}$
6 štapnih hvataljki i 2 zaštitna užeta	0,2496	$2,33 \cdot 10^{-5}$
7 štapnih hvataljki i 2 zaštitna užeta	0,167	$1,83 \cdot 10^{-5}$
8 štapnih hvataljki i 2 zaštitna užeta	0,083	$8,66 \cdot 10^{-6}$
9 štapnih hvataljki i 2 zaštitna užeta	0	$8,12 \cdot 10^{-6}$

Međutim sa aspekta ostvarene zone zaštite (slika 7.13) može se zaključiti da bi tada jedan deo postrojenja 110 kV "Đerdap 1" ostao nezaštićen. Potvrđuje se činjenica da samo ispunjenje oba kriterijuma (i kriterijum rizika i kriterijum ostvarene zone zaštite) opisuju najefikasniju zaštitu od atmosferskih pražnjenja.

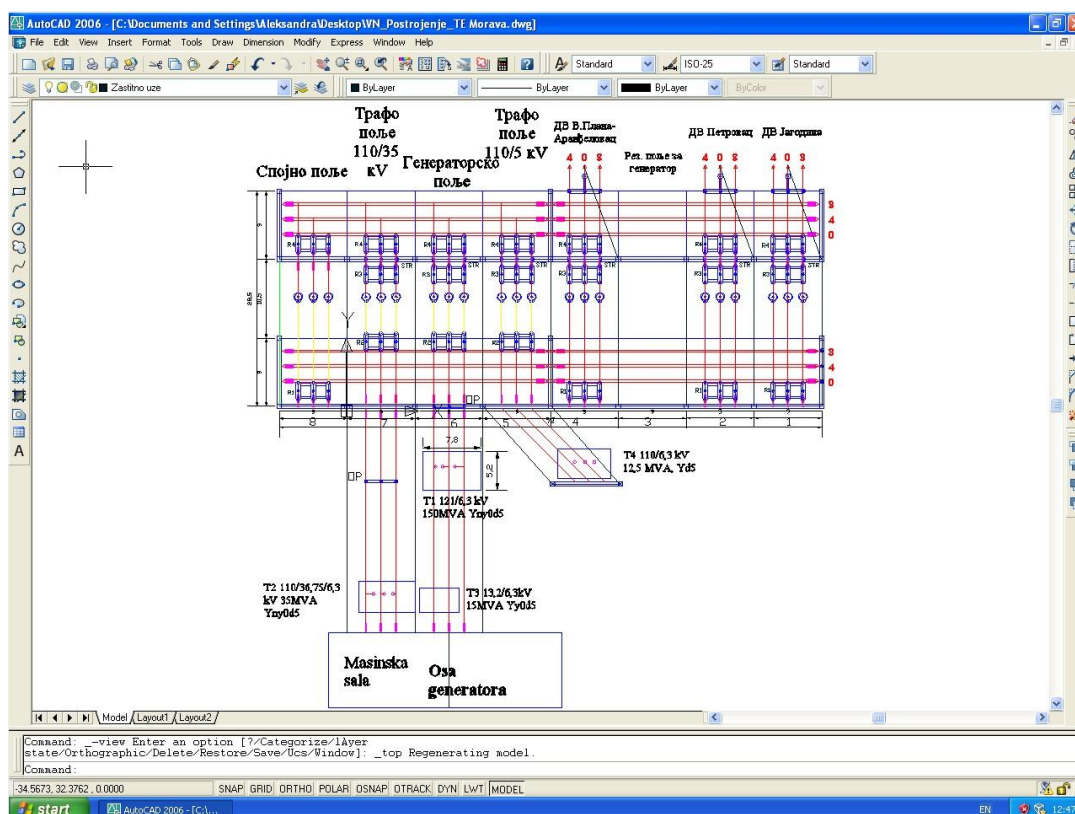
## 7.2 Primer TE "Morava" sa postrojenjem 110 kV

Instalisana snaga TE "Morava" je 125 MW. Postrojenja 110 kV i 35 kV, izgrađena su na otvorenom prostoru, sa jednim glavnim i jednim pomoćnim sistemom sabirnica. Na slici 7.25 je prikazan deo sa sabirničkim rastavljačima 110 kV postrojenja TE "Morava".



Slika 7.25: Prikaz dela 110 kV postrojenja TE "Morava"

Na slici 7.26 i 7.27 prikazano je 110 kV postrojenje TE "Morava" u 2D i 3D prikazu respektivno. Na slikama 7.26 i 7.27, zbog bolje preglednosti, plavom bojom su iscrtani elementi postrojenja: prekidači, rastavljači, strujni i naponski transformatori, odvodnici prenapona kao i stubovi koji nose sabirnice i fazne provodnike. Crvenom bojom su iscrtane glavne i pomoćne sabirnice kao i fazni provodnici. Roze bojom su iscrtani izolatori, dok su žutom bojom predstavljene krute veze. Zelenom bojom predstavljena su zaštitna užad kao jedini elementi prihvatnog sistema gromobranske zaštite 110 kV postrojenja TE "Morava". Prihvatni sistem gromobranske instalacije iznad tri blok transformatora T<sub>1</sub>, T<sub>2</sub> i T<sub>3</sub> realizovan je pomoću tri zaštitna užeta postavljena od spusnog sistema mašinske sale do ulaznih portala u 110 kV postrojenje. Transformator sopstvene potrošnje T<sub>4</sub> zaštićen je sa dva zaštitna užeta postavljena između dva stuba ispred i stubova između petog polja postrojenja TE "Morava", kao što je prikazano na slici 7.26 i 7.27.

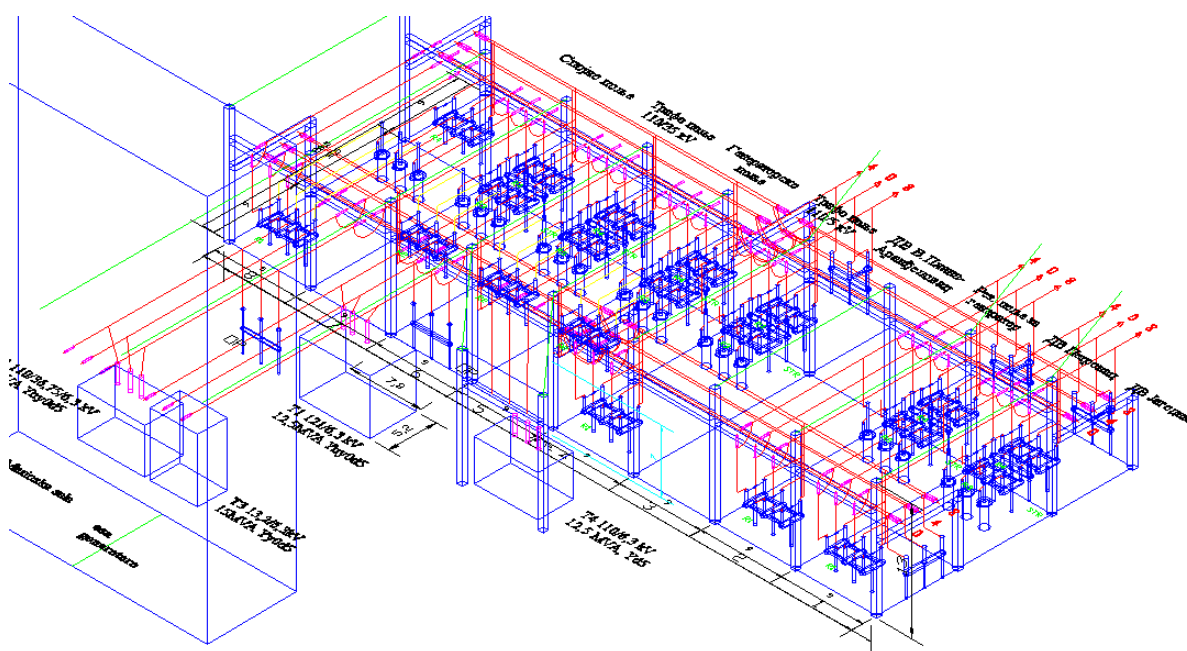


Slika 7.26: 2D prikaz dispozicije 110 kV postrojenja TE "Morava"



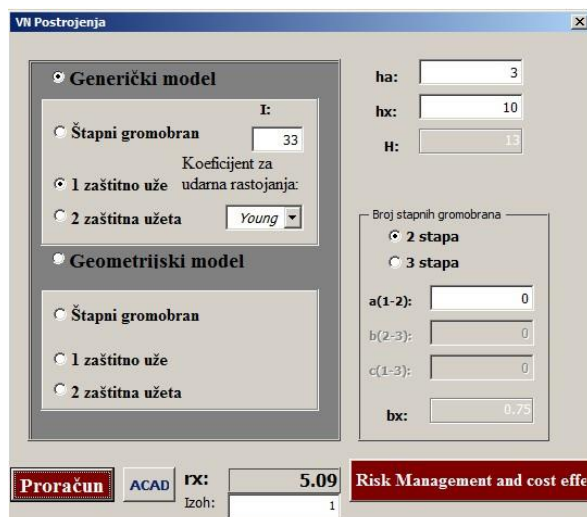
Prihvatni sistem postojeće gromobranske instalacija 110 kV postrojenja TE "Morava" izvedena je sa tri zaštitna užeta koja su postavljena na visini stubova ulaznih portala u 110 kV postrojenju od 13 m koji spajaju spusni sistem mašinske sale i vrhove tri stuba ulaznih portala. Prihvatni sistem mašinske sale realizovan je pomoću mreže provodnika.

Na slici 7.27 zaštitna užad su prikazana crnom bojom. Dalje su sa svih 9 stubova postavljena zaštitna užad preko glavnih sabirnica do susednih stubova iste visine od 13 m. Sa stubova koji pripadaju polju 1, 2 i 4 zaštitna užad su povezana sa dalekovodima Jagodina, Petrovac i Velika Plana – Arandelovac.



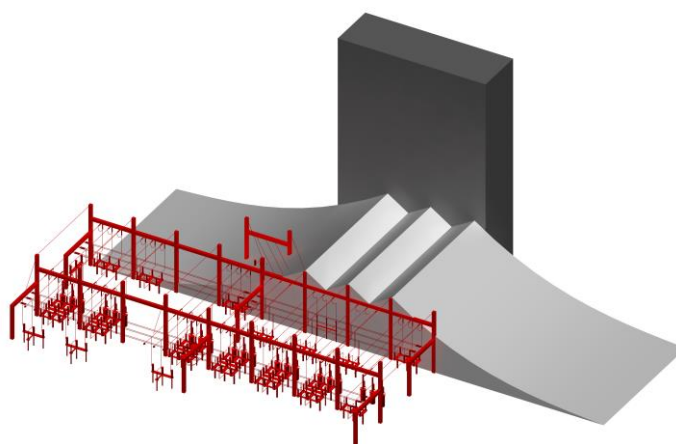
Slika 7.27: 3D prikaz 110 kV postrojenja TE "Morava"

Slika 7.27 prikazana je sa uvećanim detaljima u prilogu na slici 10.15. Na slici 7.28 je prikazana maska softverskog alata "VN Postrojenja" za proračun poluprečnika (širine) zone zaštite ako je visina najviše tačke koja treba da se štiti u 110 kV postrojenju TE "Morava" 10 m, a visina postavljanja zaštitnog užeta 13 m. Zadana vrednost amplitude struje atmosferskog pražnjenja je 33 kA, a izrazi koji su korišćeni za proračun širine zone zaštite  $r_x$  predloženi su od strane autora Young [3].



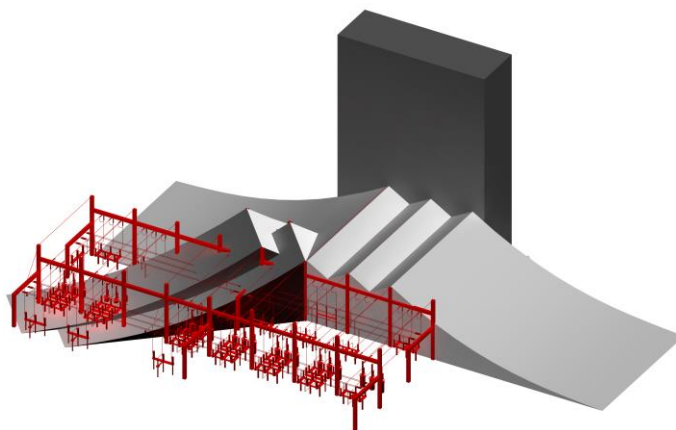
Slika 7.28: Maska softverskog alata "VN Postrojenja" za 110 kV postrojenja TE "Morava"

Zbog velikog broja elemenata u postrojenju korišćeni su renderovani modeli, odnosno modeli punog tela kako samog postrojenja tako i realizovane zone zaštite. Na slici 7.29 prikazan je renderovan model zone zaštite realizovane pomoću tri zaštitna užeta postavljena na visini od 13 m između spusnog sistema mašinske sale i tri portalna stuba na ulazu u spojno polje, transformatorsko polje 110 kV/35 kV i generatorsko polje postrojenja (polje 8, 7 i 6 respektivno). Iz realizovanog renderovanog modela se zaključuje da su sva tri transformatora  $T_1$ ,  $T_2$  i  $T_3$  u potpunosti zaštićeni postavljanjem tri zaštitna užeta na visini od 13 m.



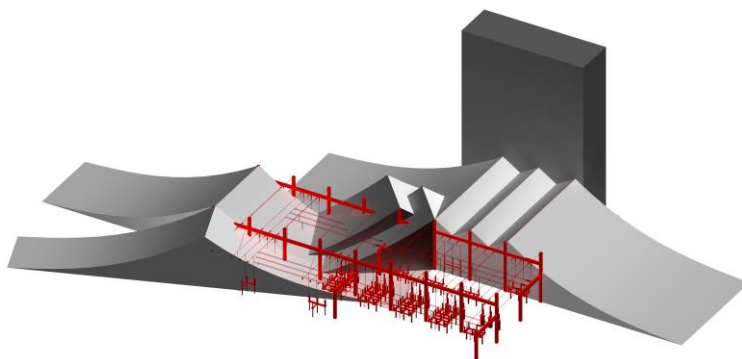
Slika 7.29: Renderovan 3D model realizovane zone zaštite pomoću tri zaštitna užeta između mašinske sale i ulaznih portala u postrojenje

Na slici 7.30 je prikazan renderovan model gromobranske zaštite sa dodata još dva zaštitna užeta na realizovanu gromobransku zaštitu sa slike 7.29 i to između pomoćnih portala ispred polja 4 (DV Velika Plana – Arandelovac) i ulaznih portala polja 5 (Transformatorsko polje 110 kV/35 kV). Iz renderovanog modela prikazanog na slici 7.30 može se zaključiti da je transformator  $T_4$  u potpunosti zaštićen od atmosferskog pražnjenja dodavanjem pomoćnih stubova ispred polja 4 i postavljanjem dva zaštitna užeta ka ulaznim portalima polja 5.



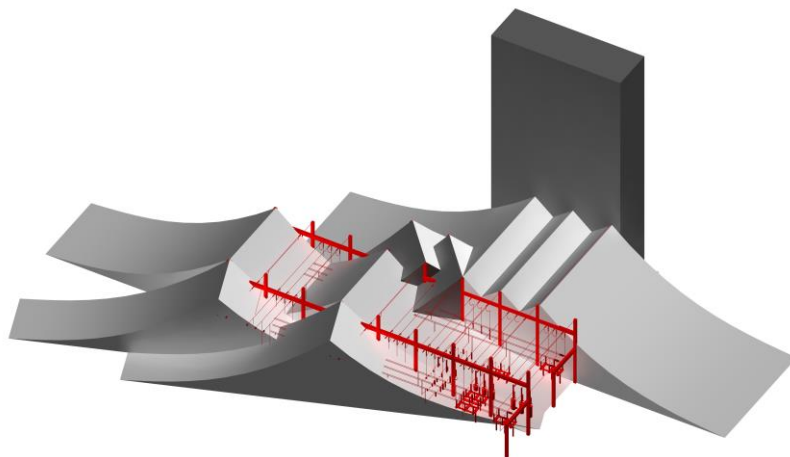
Slika 7.30: Renderovan 3D model realizovane zone zaštite pomoću pet zaštitnih užadi

Na slici 7.31 je prikazan renderovan model gromobranske zaštite sa dodata još dva zaštitna užeta na realizovanu gromobransku zaštitu sa slike 7.29 i to između prvog stuba polja 1 (DV 110 kV Jagodina) i vrha stuba dalekovoda 110 kV koji napaja Jagodinu sa TE "Morava". Sa slike 7.31 se može zaključiti da su zonom gromobranske zaštite obuhvaćeni svi elementi postrojenja (rastavljači prekidači, strujni i naponski transformatori) u polju 1.



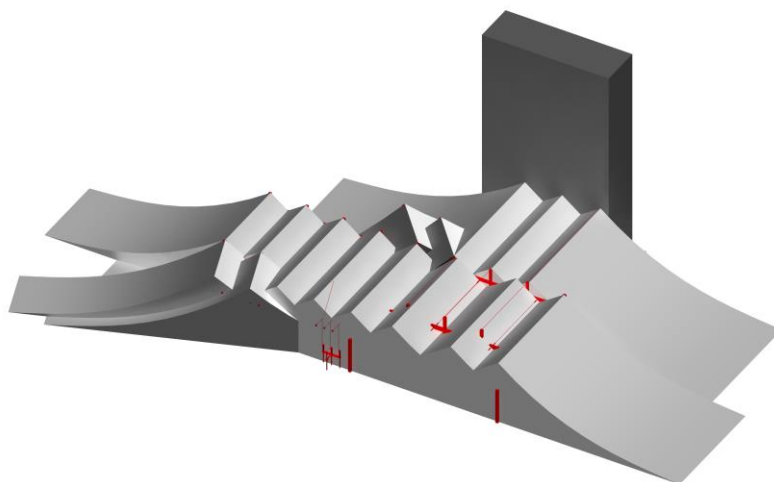
Slika 7.31: Renderovan 3D model realizovane zone zaštite sa sedam zaštitnih užadi

Na slici 7.32 je prikazan renderovan model gromobranske zaštite sa dodata još dva zaštitna užeta na realizovanu gromobransku zaštitu prikazanu na slici 7.31 i to između prvog stuba polja 4 (DV Velika Plana – Arandjelovac) i vrha stuba dalekovoda 110 kV koji napaja Veliku Planu i Arandjelovac sa TE "Morava". Sa slike 7.32 se može zaključiti da je gromobranskom zaštitom sada obuhvaćeno i kompletno polje 4 sa pripadajućim elementima postrojenja.



Slika 7.32: Renderovan 3D model realizovane zone zaštite sa devet zaštitnih užadi

Dodavanjem svih postojećih zaštitnih užadi na stubove svakog polja postrojenja na TE "Morava" može se zaključiti da je zonom gromobranske zaštite obuhvaćeno celokupno postrojenje TE "Morava", kao što je i prikazano na slici 7.33.



Slika 7.33: Renderovan 3D model kompletno realizovane zone zaštite TE "Morava"

Za procenu pojedinačnih i zbirnih rizika od atmosferskog pražnjenja i nastalih šteta od atmosferskog pražnjenja u postrojenje koristi se nadogradnja softverskog alata

za vizuelizaciju zaštitne zone postrojenja "Risk management and cost effective by IEC-62305", čija je aplikacija prikazana na slici 7.34. Popunjavanjem odgovarajućih polja u aplikaciji za procenu rizika, vrednostima koje su odgovarajuće za 110 kV postrojenje TE "Morava", dobijaju se odgovarajući rezultati za rizike i štete, čije su vrednosti prikazane u tabeli 7.8.

Slika 7.34: Rizici i štete nastale prilikom atmosferskog pražnjenja u postrojenje 110 kV TE "Morava"

Prilikom popunjavanja aplikacije za procenu rizika kvara prikazanoj na slici 7.34 treba imati u vidu da se TE "Morava" nalazi u seoskoj okolini i da nema drugih objekata u blizini, što bitno utiče na koeficijente  $C_d$  i  $C_e$ . Za odabrane vrednosti troškova za  $C_B$ ,  $C_S$ ,  $C_C$  i  $C_P$  dobija se rezultat za uštedu novca  $S$  koji je pozitivna vrednost, na osnovu čega se zaključuje da je gromobranska instalacija ekonomski isplativa. Pogrešan izbor cene gromobranskih elemenata  $C_P$  kao i nedozvoljene vrednosti za rizike mogu dovesti do rezultata koji karakteriše ekonomski neisplativu gromobransku instalaciju. U tom slučaju bi vrednost uštede novca na godišnjem nivou bila  $S < 0$ .

Tabela 7.8: Ulazni podaci za procenu rizika kvara i šteta od atmosferskog pražnjenja za postrojenje 110 kV TE "Morava" i odgovarajući rezultati

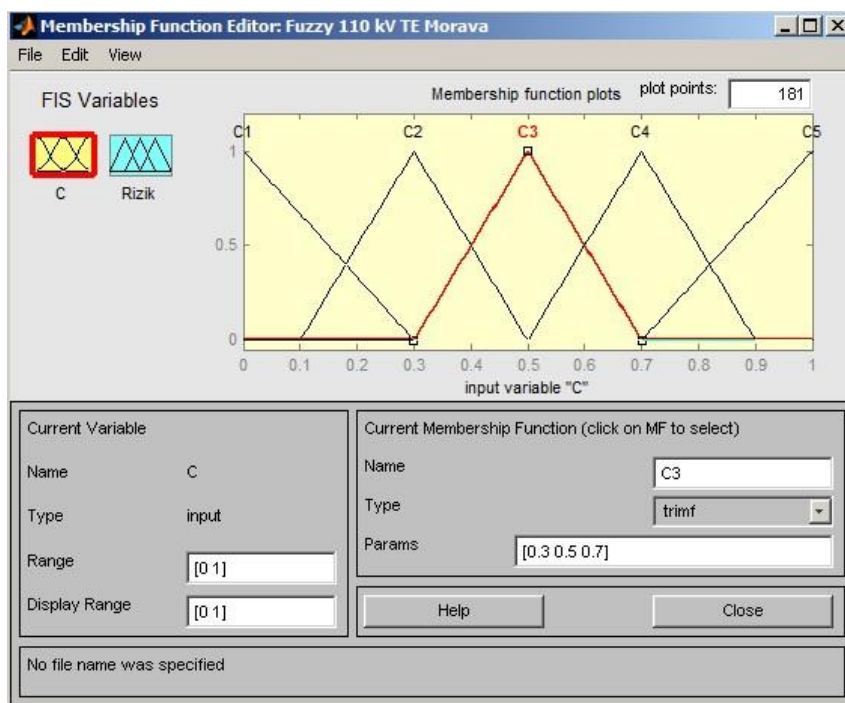
<i>Ulazni podaci</i>		<i>Rezultati</i>	
	110kV TE "Morava"		110kV TE "Morava"
$T_d$	35	$N_D$	0,05
Nivo objekta	I	$N_L$	0,01
$C_d$	1	$N_I$	0,01
$C_t$	0,2	$R_V$	$2,05 \cdot 10^{-8}$
$C_e$	1	$R_B$	$2,05 \cdot 10^{-8}$
$L$ (m)	72	$R_W$	$1,02 \cdot 10^{-7}$
$W$ (m)	28,5	$R_Z$	0
$H$ (m)	13	$R_C$	$5,1 \cdot 10^{-7}$
$P_B$	0,02	$R_F$	$6,16 \cdot 10^{-7}$
$P_C$	0,01	$R_O$	$1,97 \cdot 10^{-6}$
$r_p$	0,2	$R_{Dmin}$	$1,23 \cdot 10^{-7}$
$r_f$	0,1	$R_I$	$7,19 \cdot 10^{-7}$
		$R_{Dmax}$	$1,23 \cdot 10^{-5}$
$C_B$ (NJ)	50000	$C_{PM}$ (NJ)	15
$C_S$ (NJ)	150000	$C_L$ (NJ)	18,48
$C_C$ (NJ)	50000	$C_{RL}$ (NJ)	0,21
$C_P$ (NJ)	150	$S$ (NJ)	3,27

Kada se posmatraju odgovarajući troškovi u tabeli 7.8 i na slici 7.34, može se zaključiti da je za zadate ulazne podatke za troškove, gromobrnska instalacija ekonomski isplativa, odnosno da njenim prisustvom dolazi do ostvarenja uštede novca (veličina  $S > 0$ ). Variranjem veličine  $C_P$  koja opisuje nabavnu vrednost gromobrnskih elemenata u odnosu na veličine  $C_B$ ,  $C_S$  i  $C_C$  (objašnjeno u poglavlju 4.4) može se pronaći granična nabavna vrednost  $C_P$  za koju je gromobrnska instalacija isplativa.

Korišćenjem fuzzy logike može se vršiti i procena rizika u odnosu na izvedenu gromobrnsku instalaciju kao što je objašnjeno u poglavlju 4.5. Ako se posmatra postrojenje 110 kV TE "Morava" sa vrednostima za  $R_{Dmax} = 1,23 \cdot 10^{-5}$  za  $C = 1$  i  $R_{Dmin} = 1,23 \cdot 10^{-7}$  za  $C = 0$  (tabela 7.8) može se dobiti vrednost za koeficijent  $C$  kada je  $R_D = R_T$  (tolerantnom riziku, izraz 4.8). Kao i za primer HE "Đerdap 1" vrednost  $C$  predstavlja ulazni podatak u fuzzy regulator analiziran u softverskom alatu "Fuzzy Logic Toolbox – Matlab" i prikazan sa odgovarajućim funkcijama pripadnosti kao na slici 7.17. Rizik  $R_D$  predstavljen je kao izlaz iz fuzzy regulatora sa odgovarajućim

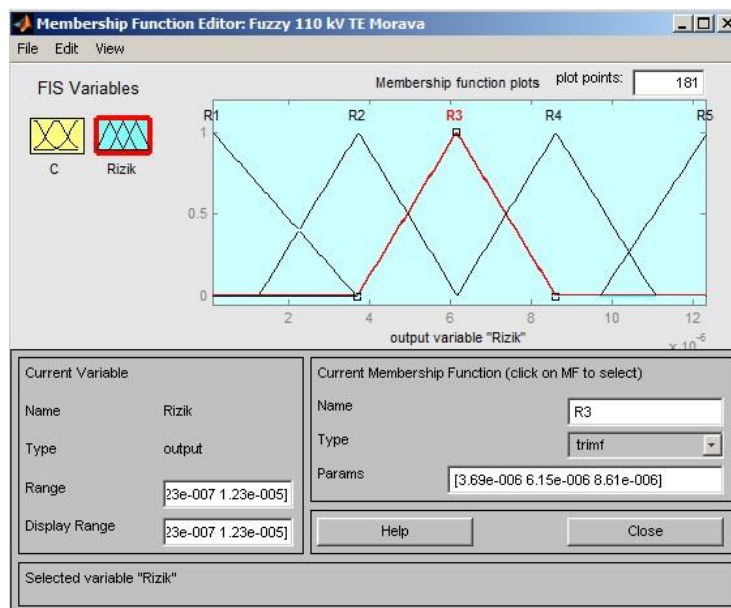
funkcijama pripadnosti (slika 7.18). Granične vrednosti rizika  $R_{Dmin}$  i  $R_{Dmax}$  dobijene pomoću softverskog alata "Risk management and cost effective by IEC 62305" definišu opseg funkcija pripadnosti za  $R_D$  slično kao što je prikazano na slici 7.18. Jedina razlika, u odnosu na primer za HE "Đerdap 1", je u tome što su granične vrednosti za  $R_D$  odgovarajuće za primer postrojenja 110 kV TE "Morava" (tabela 7.8).

Primenjujući fuzzy odlučivanje dobija se zavisnost rizika  $R_D$  u funkciji koeficijenta  $C$ . Na slici 7.35 su prikazane zadate funkcije pripadnosti broja  $C$  za postrojenje 110 kV TE "Morava". Na slici 7.36 su prikazane vrednosti funkcija pripadnosti rizika  $R_D$  za postrojenje 110 kV TE "Morava".



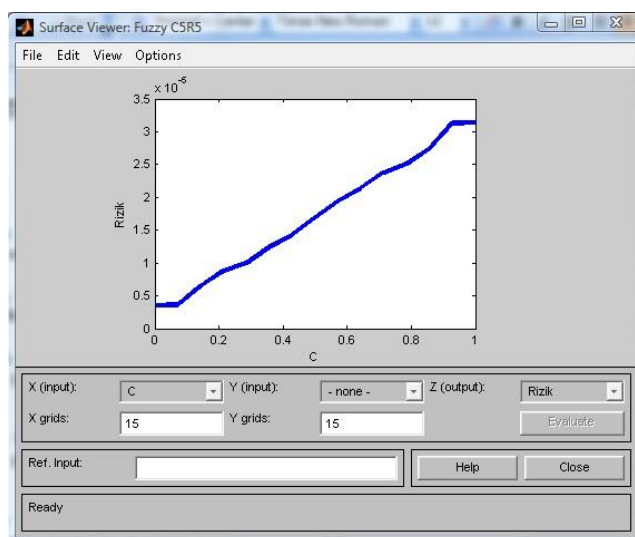
Slika 7.35: Funkcije pripadnosti  $C$  za postrojenje 110 kV TE "Morava"

Na osnovu proračunatih vrednosti rizika za postrojenje 110 kV TE "Morava" moguće je definisati funkcije pripadnosti za  $C$  i  $R_D$  [70] kao što je već definisano u poglavlju 4.5. Primenjujući fuzzy odlučivanje u proceni vrednosti  $C$  i  $R_D$  dobija se zavisnost rizika u funkciji koeficijenta  $C$  (slika 7.37).



Slika 7.36: Funkcije pripadnosti rizika  $R_D$  za postrojenje 110 kV TE "Morava"

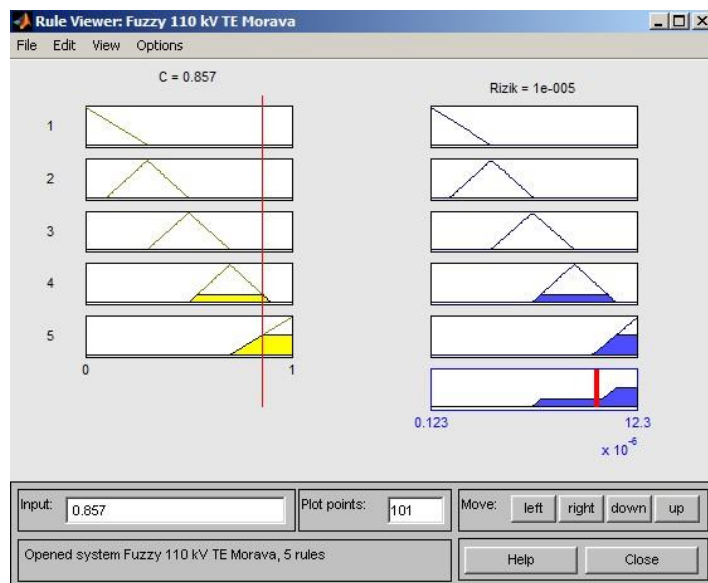
Algoritam aproksimativnog rezonovanja čini skup svih pravila u proceni rizika kvara od atmosferskog pražnjenja u postrojenje 110 kV TE "Morava", a može se grafički predstaviti primenom softverskog alata "Fuzzy Logic Toolbox – Matlab" (slika 7.38). Na ovaj način moguće je za veliki broj zadatih vrednosti za  $C$  procenjivati  $R_D$  kao što je prikazano na slici 7.38 [65].



Slika 7.37: Zavisnost rizika  $R_D$  za postrojenje 110 kV TE "Morava" od koeficijenta  $C$

Na slici 7.38 je prikazan postupak za dobijanje granične vrednosti za  $C$  koja odgovara vrednosti tolerantnog rizika za  $R_D$  (izraz 4.8).





Slika 7.38: Rizik  $R_D$  za postrojenje 110 kV TE "Morava" u zavisnosti od  $C$

Sa slike 7.38 se može zaključiti da je za meru izvedene gromobranske instalacije koja se može opisati sa  $C = 0,857$  procenjena vrednost rizika  $R_D = 10^{-5}$  i predstavlja graničnu vrednost za dozvoljeni rizik od direktnog atmosferskog pražnjenja (izraz (4.8)). Za sve vrednosti  $C$  koje su manje od 0,857, rizik  $R_D$  je u granicama koje se toleriše prema [1], dok je za sve vrednosti  $C$  koje su veće od vrednosti 0,857 vrednost rizika  $R_D$  neprihvatljiv sa stanovišta [1] odnosno nije zadovoljen uslov dat izrazom (4.8).

U tabeli 7.9 prikazane su vrednosti ukupnog rizika  $R_D$  u funkciji zadatih vrednosti za  $C$  dobijenih primenom softverskog alata "Fuzzy Logic Toolbox – Matlab" [62]. Vrednosti za  $C$  variraju od 0 (kada je 100% efikasna gromobranska instalacija) do 1 (kada nema gromobranske instalacije) sa korakom od 0,08.

Tabela 7.9: Zavisnost rizika  $R_D$  u funkciji koeficijenta  $C$  za postrojenje 110 kV TE "Morava"

$C$	$R_D$	$C$	$R_D$
0	$1,27 \cdot 10^{-6}$	0,56	$6,97 \cdot 10^{-5}$
0,08	$1,35 \cdot 10^{-6}$	0,64	$7,79 \cdot 10^{-5}$
0,16	$2,63 \cdot 10^{-6}$	0,72	$8,72 \cdot 10^{-5}$
0,24	$3,39 \cdot 10^{-6}$	0,8	$9,28 \cdot 10^{-5}$
0,32	$4,05 \cdot 10^{-5}$	0,88	$1,06 \cdot 10^{-5}$
0,4	$4,94 \cdot 10^{-5}$	0,96	$1,15 \cdot 10^{-5}$
0,48	$5,83 \cdot 10^{-5}$	1	$1,15 \cdot 10^{-5}$

Na osnovu grafika prikazanog na slici 7.38 i podataka iz tabele 7.9 može se zaključiti da je za meru kvaliteta izvedene gromobranske instalacije koja je opisana sa  $C = 0$ , presudan kriterijum procenjene vrednosti rizika. To bi značilo da je najbolje moguće izvedena gromobranska instalacija za procenjenu vrednost rizika  $R_D = 1,27 \cdot 10^{-6}$ , što zadovoljava uslov dat izrazom (4.8). Ovaj zaključak verno opisuje realno stanje s obzirom da ne postoji 100 % gromobranska zaštita odnosno uvek postoji rizik da će atmosfersko pražnjenje izazvati oštećenje dela postrojenja. Za meru gromobranske instalacije koja je opisana sa  $C = 1$ , (što bi značilo da ne postoji gromobranska instalacija), procenjena vrednost rizika od direktnog atmosferskog pražnjenja predstavljena je vrednošću  $R_D = 1,15 \cdot 10^{-5}$ . Ova vrednost rizika  $R_D$  ne zadovoljava uslov dat izrazom (4.8). Procenjena vrednost rizika  $R_D$  odgovara najvećem mogućem riziku, što je u skladu sa pretpostavkom o nepostojanju gromobranske instalacije.

Primenom softverskog alata za 3D prikaz zone zaštite gromobranske instalacije postrojenja [39] "*VN Postrojenja*" i odgovarajućih postupaka i tehnika u AutoCAD-u [53] određene su zone zaštite gromobranske instalacije u funkciji broja primenjenih zaštitnih užadi (slike 7.29, 7.30, 7.31, 7.32 i 7.33). Rezultati su generisani za struju atmosferskog pražnjenja od 33 kA i za izraz širine zone zaštite koji je predložen od strane autora Young [3]. Ako se pretpostavi da je, u vizuelnom smislu, najkompletnija gromobranska instalacija izvedena pomoću svih 15 zaštitnih užadi, vrednosti  $C$  može se dodeliti minimalna vrednost. Za gromobransku instalaciju izvedenu sa 1, 2, 3,...,15 užadi može se zaključiti da je izvedena sa odgovarajućom merom  $C$  kojoj se pridružuju vrednosti 0,938; 0,871; 0,804;..., 0, respektivno. Vrednosti za  $C$  su dobijene polazeći od pretpostavke da je sa petnaest zaštitnih užadi ostvarena maksimalna zona zaštite i tada je dodeljena vrednost  $C = 0$  (slika 7.33). Sa tri zaštitna užeta ostvarena je zona zaštite od 19,6 % , što odgovara broju  $C = 0,804$  (slika 7.29). Sa devet zaštitnih užadi ostvarena je zona zaštite od 59,8 % , što odgovara broju  $C = 0,402$  (slika 7.32). Unošenjem navedenih vrednosti za  $C$  u softverski alat "*Fuzzy Logic Toolbox – Matlab*", koji je formiran na osnovu konkretnog 110 kV postrojenja TE "Morava", dobijaju se odgovarajuće vrednosti za rizik  $R_D$ . Upotrebom fuzzy logike dobijene su vrednosti za rizik  $R_D$  u funkciji broja gromobranskih elemenata (tabela 7.10).

Tabela 7.10: Zavisnost rizika  $R_D$  od broja gromobranskih elemenata

<i>Broj zaštitnih užadi</i>	<i>C</i>	<i>R<sub>D</sub></i>
1	0,938	$1,14 \cdot 10^{-5}$
2	0,871	$1,03 \cdot 10^{-5}$
3	0,804	$9,32 \cdot 10^{-6}$
4	0,737	$8,82 \cdot 10^{-6}$
5	0,67	$8,14 \cdot 10^{-6}$
6	0,603	$7,41 \cdot 10^{-6}$
7	0,536	$6,69 \cdot 10^{-6}$
8	0,469	$5,68 \cdot 10^{-6}$
9	0,402	$4,96 \cdot 10^{-6}$
10	0,335	$4,25 \cdot 10^{-6}$
11	0,268	$3,56 \cdot 10^{-6}$
12	0,201	$3,09 \cdot 10^{-6}$
13	0,134	$2,19 \cdot 10^{-6}$
14	0,067	$1,33 \cdot 10^{-6}$
15	0	$1,27 \cdot 10^{-6}$

Na osnovu rezultata prikazanih u tabeli 7.10 može se zaključiti da je sa aspekta rizika od direktnog atmosferskog pražnjenja, zadovoljen izraz (4.8), u slučajevima kada su upotrebljena 3, 4, 5,...,15 zaštitna užeta za realizaciju prihvatnog sistema gromobranske instalacije. Međutim sa prikaza na slikama 7.29, 7.30, 7.31, 7.32 i 7.33 se primećuje da značajan deo postrojenja 110 kV TE "Morava" nije u zoni zaštite primenom 3,4,...,15 zaštitnih užadi. Može se zaključiti da samo ispunjenje oba kriterijuma (i kriterijuma rizika i kriterijuma ostvarene zone zaštite) opisuju najefikasniju zaštitu od atmosferskih pražnjenja.

### 7.3 Primer HE "Bistrica" sa postrojenjem 220 kV

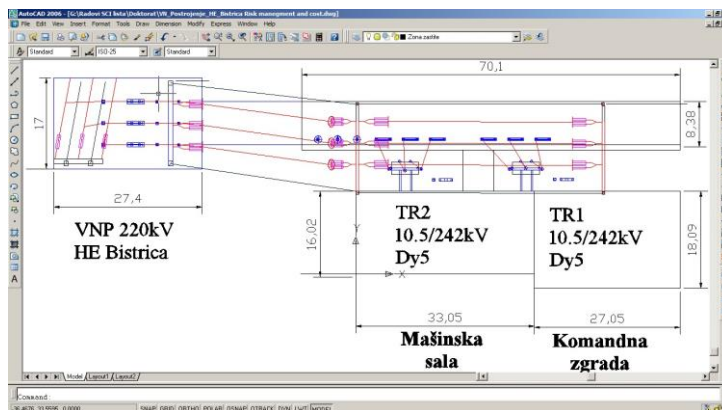
Hydroenergetski objekat HE "Bistrica" sastoji se od mašinske sale sa agregatima, komandnog dela, kao i dela u kome je smešten kućni agregat. U mašinskoj zgradi smeštene su dve turbine sa vertikalnom osovinom i generatorima direktno povezanih na njih, snage 104 MW, turbinskim zvonastim zatvaračem, pomoćnim tablastim zatvaračem na odvodu, regulatorima brzine i pritiska. Prema osnovnoj šemi HE "Bistrica" izabrana su dva trofazna blok – transformatora snage po 54 MVA, napona 10,5 kV / 242 kV. Postrojenje u HE "Bistrica", koje je prvi put u tadašnjoj Jugoslaviji

pušteno pod napon od 220 kV, preko dalekovoda dugog 200 km plasira električnu energiju u sistem EPS-a. Prihvatni sistem gromobranske instalacije svih objekata koji se nalaze u sklopu HE "Bistrica" (mašinska sala, komandna zgrada i postrojenje 220 kV) realizovana je pomoću šest zaštitnih užadi. Na slici 7.39 je prikazano 220 kV dalekovodno polje i visokonaponski elementi postrojenja 220 kV HE "Bistrica".

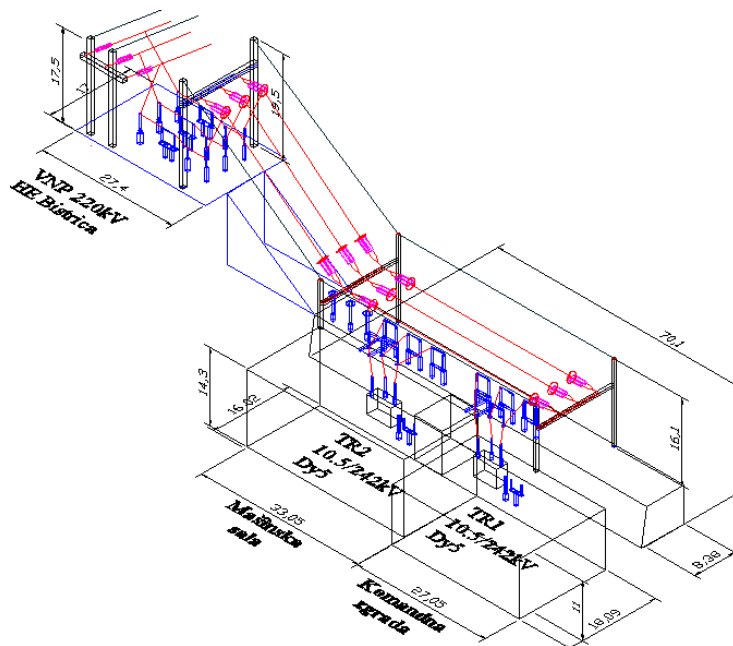


Slika 7.39: 220 kV postrojenje HE "Bistrica"

Mašinska sala i komandna zgrada dodatno su štice od atmosferskog pražnjenja pomoću mreže provodnika. Dva zaštitna užeta nalaze se na sabirnicama 220 kV, visine 16,1 m koje se nalaze iznad dva transformatora snage 54 MVA, sprege Dy5, naponskog nivoa 10,5 kV/242 kV. Sledeća dva zaštitna užeta spajaju 220 kV sabirnice visine 16,1 m i ulazne portale u postrojenju 220 kV HE "Bistrica", visine 19,5 m. Poslednja dva zaštitna užeta štite 220 kV dalekovodno polje i elemente postrojenja HE "Bistrica" i postavljena su na visini 17,5 m. Na slici 7.40 i 7.41 prikazano je 220 kV postrojenje HE "Bistrica" u 2D i 3D prikazu respektivno, nacrtano u Auto Cad-u [53].



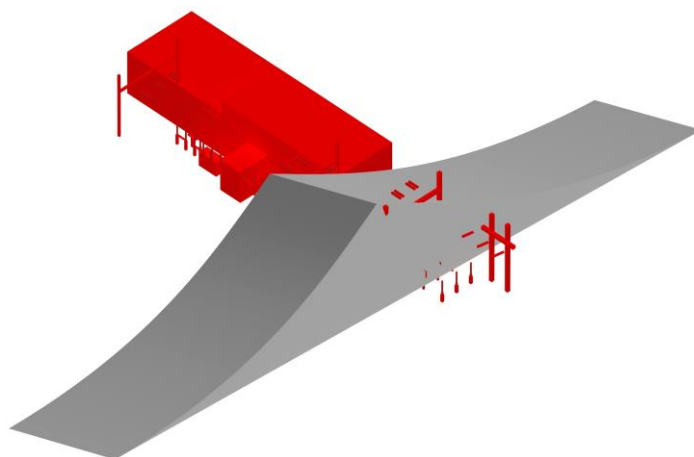
Slika 7.40: 2D prikaz dispozicije 220kV postrojenja HE "Bistrica"



Slika 7.41: 3D prikaz 220 kV postrojenja HE "Bistrica"

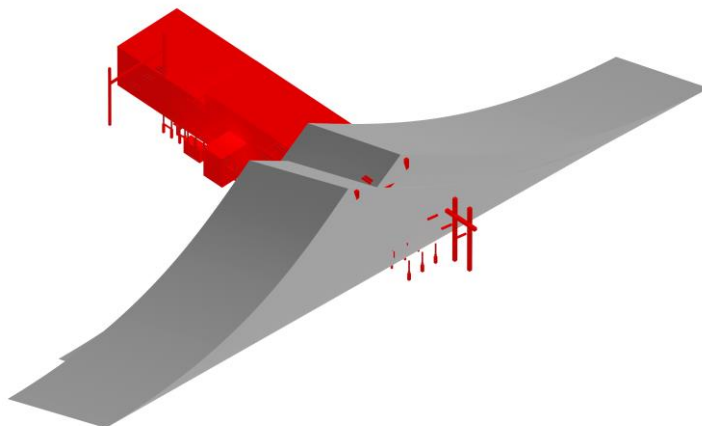
Slike 7.40 i 7.41 su sa detaljnim prikazom visokonaponskih elemenata predstavljene na slikama 10.21 i 10.22 u prilogu.

Na slici 7.42 je prikazan renderovan model postrojenja 220 kV HE "Bistrica" kada je prihvatni sistem gromobranske instalacije realizovan sa jednim zaštitnim užetom između ulaznih portala u postrojenje 220 kV i izlaznih portala transformatorskog polja. Crvenom bojom je označen deo objekta koji se ne nalazi u zaštitnoj zoni gromobranske zaštite jednog zaštitnog užeta.



Slika 7.42: 3D model zone zaštite 220 kV postrojenja HE "Bistrica" realizovan sa jednim zaštitnim užetom

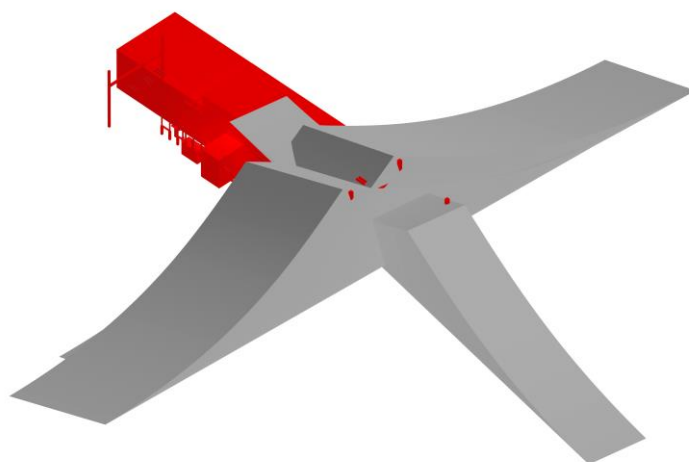
Sa slike 7.42 se može zaključiti da su ostali nezaštićeni energetski transformatori, mašinska sala i komandna zgrada, kao i veći broj visokonaponskih elemenata 220 kV postrojenja HE "Bistrica". Na slici 7.43 je prikazan renderovan model gromobranske zaštite sa dodatim još jednim zaštitnim užetom na realizovanu gromobransku zaštitu sa slike 7.42. Zaštitno uže je dodato između ulaznih portala u postrojenje i izlaznih portala transformatorskog polja.



Slika 7.43: 3D model zone zaštite 220 kV postrojenja HE "Bistrica" realizovane sa dva zaštitna užeta

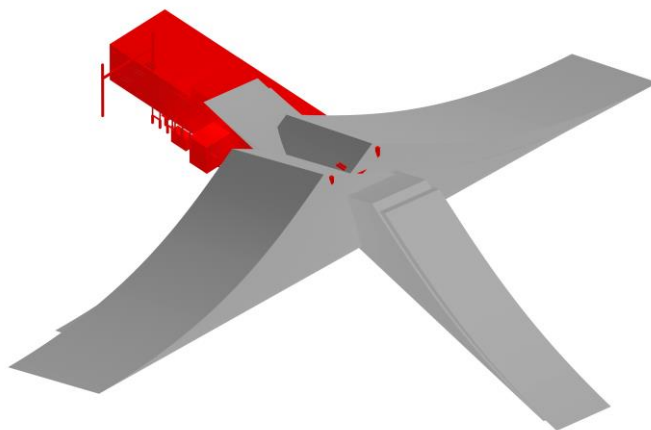
Sa slike 7.43 se može zaključiti da su ostali nezaštićeni energetski transformatori, mašinska sala i komandna zgrada, dok se veći broj visokonaponskih elemenata 220 kV postrojenja HE "Bistrica" nalazi u zoni zaštite realizovane gromobranske instalacije.

Na slici 7.44 je prikazan renderovan model gromobranske zaštite sa dodatim još jednim zaštitnim užetom na gromobransku instalaciju koja je prikazana na slici 7.43. Dodatno zaštitno uže se nalazi između izlaznih portala iz postrojenja 220 kV "Bistrica" i 220 kV dalekovoda koji spaja HE "Bistrica" sa HE "Bajina Bašta". Ovim je ostvarena gromobranska zaštita u čijoj zoni se nalaze skoro svi visokonaponski elementi 220 kV postrojenja HE "Bistrica". I dalje su energetski transformatori, komandna zgrada i mašinska sala ostali nezaštićeni od direktnog atmosferskog pražnjenja.



Slika 7.44: Renderovan model zone zaštite 220 kV postrojenja sa tri zaštitna užeta HE "Bistrica"

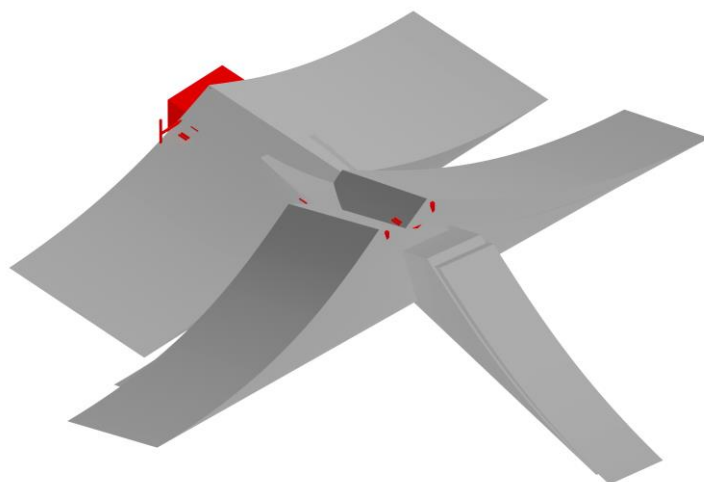
Na slici 7.45 je na već postojeću gromobransku instalaciju, prikazanu na slici 7.44, dodato i drugo zaštitno uže koje se nalazi iznad 220 kV dalekovoda koji spaja HE "Bistrica" i HE "Bajina Bašta". Tako je ostvarena gromobranska instalacija u čijoj zoni zaštite se nalaze svi visokonaponski elementi 220 kV postrojenja HE "Bistrica".



Slika 7.45: 3D model zone zaštite 220 kV postrojenja HE "Bistrica" sa četiri zaštitna užeta

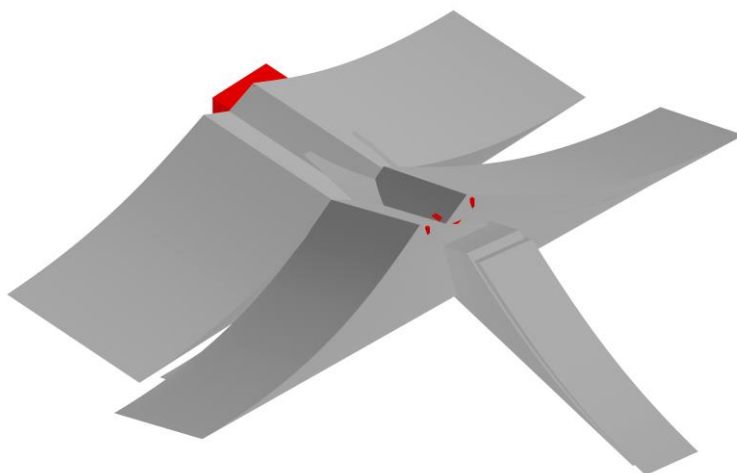
Na slici 7.46 je prikazan renderovan model zone zaštite gromobranske instalacije kome je dodato zaštitno uže između ulaznih i izlaznih portala transformatorskog polja na realizovanu gromobransku instalaciju prikazanu na slici 7.45. Ovako ostvarena zona

zaštite obuhvata oba energetska transformatora, osim nekih delova izolatorskih lanaca na ulaznim portalima transformatorskog polja.



Slika 7.46: 3D model zone zaštite 220 kV postrojenja HE "Bistrica" realizovane sa pet zaštitnih užadi

Na slici 7.47 je prikazan renderovan model celokupne zone zaštite gromobranske instalacije ostvarene sa svih šest zaštitnih užadi.



Slika 7.47: 3D model zone zaštite 220 kV postrojenja HE "Bistrica" realizovane sa šest zaštitnih užadi

Sa slike 7.47 se može zaključiti da je ceo objekat obuhvaćen zonom zaštite gromobranske instalacije. Ako se tome još i doda realizovani prihvatni sistem gromobranske instalacije u vidu pocinkovanih traka na krovu mašinske i komandne



zgrade, može se zaključiti da je sa aspekta zone zaštite uspešno realizovana gromobranska instalacija.

Za procenu pojedinačnih i zbirnih rizika i nastalih šteta od atmosferskog pražnjenja u postrojenje koristi se razvijeni softverski alat za vizuelizaciju zone zaštite postrojenja, "Risk management and cost effective by IEC-62305", čija je aplikacija prikazana na slici 7.48. Popunjavanjem odgovarajućih polja u aplikaciji za konkretno 220 kV postrojenje HE "Bistrica", dobijaju se odgovarajući rezultati za rizike i štete koji su prikazani u tabeli 7.11.

Prilikom procene pojedinačnih i ukupnih rizika treba adekvatno popuniti aplikaciju prikazanu na slici 7.48. Ono što izdvaja slučaj HE "Bistrica" je visoka vrednost koeficijenta  $C_d$ , jer se postrojenje nalazi u brdovitom kraju. Usled visoke vrednosti za  $C_d$  generišu se i visoke vrednosti za srednje vrednosti broja atmosferskih pražnjenja na godišnjem nivou  $N_D$  u objekat koji je povezan sa 220 kV postrojenjem HE "Bistrica", i u samo postrojenje  $N_L$  (izrazi 4.11 i 4.12 respektivno). Usled viših vrednosti za  $N_D$  i  $N_L$  generišu se i nešto više vrednosti za pojedinačne i ukupne rizike od atmosferskih pražnjenja u postrojenje.

**Risk Management and cost effective by IEC-62305-2**

**Određivanje nivoa zaštite**  
 Struja atm. pražnjenja: 200  
 Mapa izokerauničkog nivoa

**Uticaj okoline na VNP**  
 VNP u brdima: Cd: 2  
 Jk transformatora u sklopu VNP: Ct: 0.2  
 Seoska okolina: Ce: 1

**Proračun broja atm. pražnjenja**  
 $N_D$ : 0.3680316  
 $N_L$ : 0.07360632  
 $N_I$ : 0.03680316  
 Proračun

**Dimenzije VNP**  
 Dužina L(m): 90  
 Širina W(m): 30  
 Visina H(m): 30  
 Dodaj  
 Reset  
 A: 49734

**Pror. odgovarajućih verov. nastalih šteta**  
 Objekat sa gromobranskom zasl:  $F_B$ : 0.02  
 Objekat sa gromobranskom zasl:  $F_C$ : 0.01

**Pror. odgov. gub. uzrokovanih atmosf. praž.**  
 Postojanje jedne od sledećih r:  $r_p$ : 0.2  
 Visok:  $r_f$ : 0.1  
 $L_b=L_v$ : 0.0002  
 $L_c=L_w=L_z=L_o$ : 0.001

**Procena pojedinačnih rizika**  
 $R_V$ : 0.0000001472126  
 $R_Z$ : 0  
 $R_B$ : 0.0000014721264  
 $R_C$ : 0.000003680316  
 $R_W$ : 0.0000007360632  
 Proračun

**Procena ukupnog rizika**  
 $R_F$ : 0.0000016193390  
 $R_D$ : 0.00000088327584  
 $R_O$ : 0.0000044163792  
 $R_I$ : 0.0000051524424

**Procena isplativosti gromobranske instalacije**  
 Nabavna vrednost objekta:  $C_B$ (NJ): 20000  
 Nabavna vrednost opreme u elektrani:  $C_S$ (NJ): 60000  
 Nabavna vrednost visokonap. elem. u VNP:  $C_C$ (NJ): 20000  
 Nabavna vrednost grom. elemenata:  $C_P$ (NJ): 150  
 Ukupni godišnji troškovi održavanj:  $C_{PM}$ (NJ): 15  
 Uneti 0 za štetu bez grom. instalacije i 1 za štetu sa grom. instalacijom: 1  
 Šteta nastala atm. praž. ako ne postoji gromobranska instalacija:  $C_L$ (NJ): 53  
 Šteta nastala atm. praž. ako postoji gromobranska instalacija:  $C_{RL}$ (NJ): 0.6  
 Ušteda novca na godišnjem nivou upotrebom gromobranske instalacije:  $S$ (NJ): 87.4  
 Gromobranska instalacija je ekonomski isplativa  
 Proračun

Slika 7.48: Rizici i štete nastale prilikom atmosferskog pražnjenja u postrojenje 220 kV HE "Bistrica"

Dobijene više vrednosti za rizike od atmosferskih pražnjenja su u skladu i sa činjenicom da je na lokaciji gde se nalazi HE "Bistrica" ukupan broj grmljavinskih dana na godišnjem nivou veći nego na lokacijama gde se nalaze HE "Đerdap 1" i TE "Morava". Iz navedenih činjenica se može zaključiti da se posebna pažnja mora posvetiti zaštiti elektroenergetskim objektima na brdovitom terenu gde su rizici kvara od atmosferskih pražnjenja nešto izrazitiji.

Kada se posmatraju odgovarajući troškovi prikazani na slici 7.48 i u tabeli 7.11, može se zaključiti da je za zadate ulazne podatke odgovarajućih troškova, gromobranska instalacija ekonomski isplativa, odnosno da njenim prisustvom dolazi do ostvarenja uštede novca (veličina  $S > 0$ ). Variranjem veličine  $C_p$  koja opisuje nabavnu cenu gromobranskih elemenata u odnosu na veličine  $C_B$ ,  $C_S$  i  $C_C$  (objašnjeno u poglavlju 4) može se pronaći granična nabavna cena  $C_p$  za koju je gromobranska instalacija ekonomski isplativa.

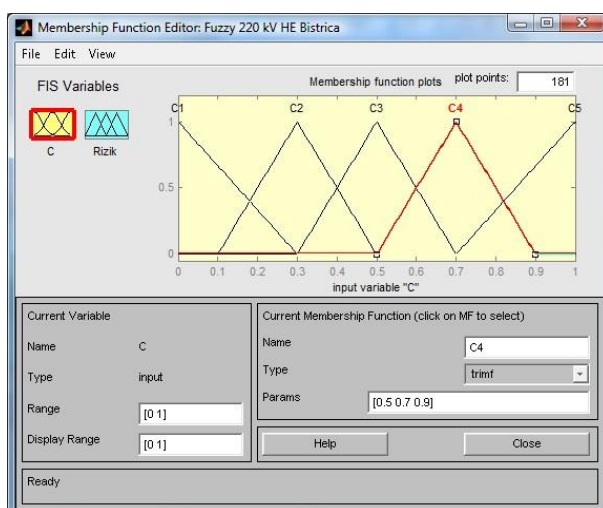
Tabela 7.11: Ulazni podaci za procenu rizika kvara i šteta od atmosferskog pražnjenja za postrojenje 220 kV HE "Bistrica" i odgovarajući rezultati

<b>Ulazni podaci</b>		<b>Rezultati</b>	
	220 kV HE "Bistrica"		220kV HE "Bistrica"
$T_d$	37	$N_D$	0,368
Nivo objekta	I	$N_L$	0,074
$C_d$	2	$N_I$	0,0368
$C_t$	0,2	$R_V$	$1,47 \cdot 10^{-7}$
$C_e$	1	$R_B$	$1,47 \cdot 10^{-6}$
$L$ (m)	90	$R_W$	$7,36 \cdot 10^{-7}$
$W$ (m)	30	$R_Z$	0
$H$ (m)	30	$R_C$	$3,68 \cdot 10^{-6}$
$P_B$	0,02	$R_F$	$1,62 \cdot 10^{-6}$
$P_C$	0,01	$R_O$	$4,41 \cdot 10^{-6}$
$r_p$	0,2	$R_{Dmin}$	$8,83 \cdot 10^{-7}$
$r_f$	0,1	$R_I$	$5,15 \cdot 10^{-6}$
		$R_{Dmax}$	$8,83 \cdot 10^{-5}$
$C_B$ (NJ)	20000	$C_{PM}$ (NJ)	15
$C_S$ (NJ)	60000	$C_L$ (NJ)	53
$C_C$ (NJ)	20000	$C_{RL}$ (NJ)	0,6
$C_P$ (NJ)	150	$S$ (NJ)	37,4

Iz tabele 7.11 se može zaključiti da je za postrojenje 220 kV pri HE "Bistrica" ukupni rizik usled direktnog atmosferskog pražnjenja  $R_{Dmin}$  u tolerantnim granicama. (izraz 4.8).

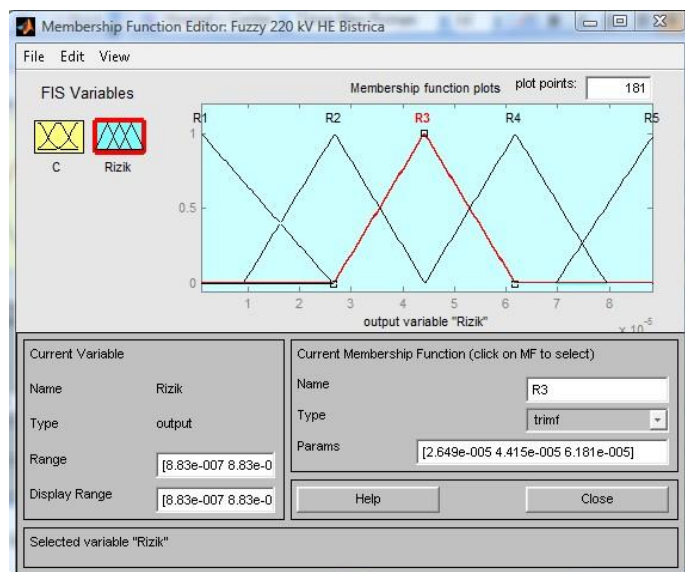
Korišćenjem fuzzy logike može se vršiti i procena rizika u odnosu na izvedenu gromobransku instalaciju kao što je objašnjeno u poglavlju 4.5. Ako se posmatra postrojenje 220 kV HE "Bistrica" sa vrednostima za  $R_{Dmax} = 8,83 \cdot 10^{-5}$  za  $C=1$  i  $R_{Dmin} = 8,83 \cdot 10^{-7}$  za  $C = 0$  (tabela 7.11) može se dobiti vrednost za koeficijent  $C$  kada je  $R_D = R_T$  (tolerantan rizik, izraz (4.8)). Granične vrednosti rizika  $R_{Dmin}$  i  $R_{Dmax}$  dobijene pomoću softverskog alata "*Risk management and cost effective by IEC 62305*" definišu opseg funkcija pripadnosti za  $R_D$ .

Koeficijent  $C$  predstavlja ulazni podatak u fuzzy regulator koji je prikazan u okviru fuzzy kontrolera u softverskom alatu "*Fuzzy Logic Toolbox – Matlab*" sa odgovarajućim funkcijama pripadnosti (slika 7.49). Rizik  $R_D$  predstavljen je na slici 7.50 sa odgovarajućim funkcijama pripadnosti.



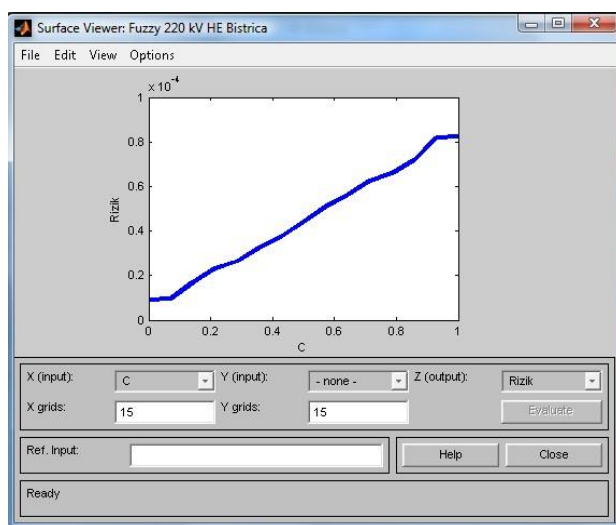
Slika 7.49: Funkcije pripadnosti za  $C$  za postrojenje 220 kV HE "Bistrica"

Na osnovu proračunatih vrednosti rizika za postrojenje 220 kV HE "Bistrica" moguće je definisati značenja za  $C$  i  $R_D$  [70] kao što je prikazano u poglavlju 4.5. Primenjujući fuzzy odlučivanje u proceni vrednosti  $C$  i  $R_D$  dobija se zavisnost rizika u funkciji koeficijenta  $C$  (slika 7.51). Algoritam aproksimativnog rezonovanja čini skup svih pravila u proceni rizika kvara od atmosferskog pražnjenja u postrojenja 220 kV HE "Bistrica", a može se grafički predstaviti primenom softverskog alata "*Fuzzy Logic Toolbox – Matlab*" (slika 7.51).



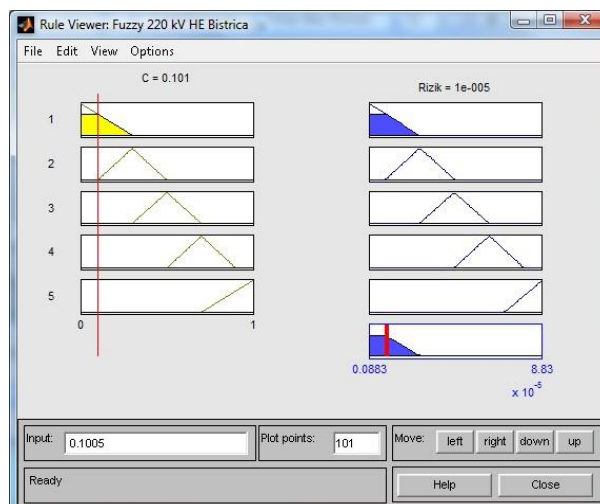
Slika 7.50: Funkcije pripadnosti za  $R_D$  za postrojenje 220 kV HE "Bistrica"

Na ovaj način moguće je za veliki broj zadatih vrednosti za  $C$  procenjivati rizike od atmosferskog pražnjenja kao što je prikazano na slici 7.52 [65].



Slika 7.51: Zavisnost rizika  $R_D$  za postrojenje 220 kV HE "Bistrica" od koeficijenta  $C$

Na slici 7.52 je prikazan slučaj granične vrednosti  $C$  koji odgovara vrednosti tolerantnog rizika za  $R_D$  (izraz 4.8).



Slika 7.52: Prikaz dobijenih vrednosti za  $R_D$  za postrojenje 220 kV HE "Bistrica" u zavisnosti od  $C$

Sa slike 7.52 se može zaključiti da je za meru izvedene gromobranske instalacije koja se može opisati sa  $C = 0,1005$  procenjena vrednost rizika od direktnog atmosferskog pražnjenja,  $R_D = 10^{-5}$ , koja predstavlja graničnu vrednost za dozvoljeni rizik od direktnog atmosferskog pražnjenja (izraz (4.8)). Za sve vrednosti  $C$  koje su manje od 0,1005, rizik od direktnog atmosferskog pražnjenja  $R_D$  je u granicama koji se toleriše [1], dok je za sve vrednosti  $C$  koje su veće od vrednosti 0,1005 vrednost rizika od direktnog atmosferskog pražnjenja  $R_D$  neprihvatljiv sa stanovišta [1] odnosno nije zadovoljen uslov dat izrazom (4.8).

U tabeli 7.12 prikazane su vrednosti ukupnog rizika  $R_D$  u funkciji zadatih vrednosti za  $C$  dobijenih primenom softverskog alata "Fuzzy Logic Toolbox – Matlab" [63].

Tabela 7.12 Zavisnost rizika  $R_D$  u funkciji  $C$  za postrojenje 220 kV HE "Bistrica"

$C$	$R_D$	$C$	$R_D$
0	$9,13 \cdot 10^{-6}$	0,56	$5,01 \cdot 10^{-5}$
0,08	$9,66 \cdot 10^{-6}$	0,64	$5,59 \cdot 10^{-5}$
0,16	$1,89 \cdot 10^{-5}$	0,72	$6,26 \cdot 10^{-5}$
0,24	$2,43 \cdot 10^{-5}$	0,8	$6,66 \cdot 10^{-5}$
0,32	$2,91 \cdot 10^{-5}$	0,88	$7,59 \cdot 10^{-5}$
0,4	$3,54 \cdot 10^{-5}$	0,96	$8,22 \cdot 10^{-5}$
0,48	$4,18 \cdot 10^{-5}$	1	$8,23 \cdot 10^{-5}$

Na osnovu grafika prikazanog na slici 7.52 i podataka iz tabele 7.12 može se zaključiti da je za meru kvaliteta gromobranske instalacije koja je opisana sa  $C = 0$ , presudan kriterijum procenjene vrednosti rizika. To bi značilo da je najbolje moguće izvedena gromobranska instalacija za procenjenu vrednost rizika od direktnog atmosferskog pražnjenja  $R_D = 9,13 \cdot 10^{-6}$ , što zadovoljava uslov dat izrazom (4.8). Ovaj zaključak verno opisuje realno stanje s obzirom da ne postoji 100 % gromobranska zaštita odnosno uvek postoji rizik da će atmosfersko pražnjenje izazvati oštećenje dela postrojenja. Za meru kvaliteta gromobranske instalacije koja je opisana sa  $C = 1$ , što bi značilo da ne postoji gromobranska instalacija, procenjena vrednost rizika od atmosferskog pražnjenja predstavljena je sa  $R_D = 8,23 \cdot 10^{-5}$ . Ova vrednost rizika  $R_D$  ne zadovoljava uslov dat izrazom (4.8). Procenjena vrednost rizika  $R_D$  odgovara najvećem mogućem riziku, što je u skladu sa pretpostavkom o nepostojanju gromobranske instalacije.

Primenom softverskog alata za 3D prikaz zone zaštite gromobranske instalacije postrojenja [39] "*VN Postrojenja*" i odgovarajućih postupaka i tehnika u AutoCAD-u [53] određene su zone zaštite gromobranske instalacije u funkciji broja primenjenih zaštitnih užadi (slike 7.42, 7.43, 7.44, 7.45, 7.46 i 7.47, respektivno). Rezultati su dobijeni za amplitude struje atmosferskog pražnjenja od 33 kA i za izraz širine zone zaštite koji je predložen od strane autora Young [3]. Ako se pretpostavi da je, u vizuelnom smislu, najkompletnija gromobranska instalacija izvedena pomoću svih 6 zaštitnih užadi, koeficijentu  $C$  može se dodeliti minimalna vrednost. Za gromobransku instalaciju izvedenu sa 1, 2, 3,...,6 užadi može se zaključiti da je izvedena sa odgovarajućim koeficijentom  $C$  kome se pridružuju vrednosti 0,833; 0,666; 0,499;...0, respektivno. Vrednosti za  $C$  su dobijene polazeći od pretpostavke da je sa šest zaštitnih užadi ostvarena maksimalna zona zaštite i dodeljena vrednost koeficijenta 0 (slika 7.47). Sa tri zaštitna užeta ostvarena je zona zaštite od 50% , što odgovara koeficijentu  $C = 0,499$  (slika 7.44). Sa dva zaštitna užeta ostvarena je zona zaštite od 33,4%, što odgovara koeficijentu  $C = 0,666$  (slika 7.43). Generisanjem navedenih vrednosti za koeficijente  $C$  u softverski alat "*Fuzzy Logic Toolbox – Matlab*" dobijaju se odgovarajuće vrednosti za rizik  $R_D$ . Upotrebom fuzzy logike dobijene su vrednosti za rizik  $R_D$  u funkciji broja gromobranskih elemenata (tabela 7.13).

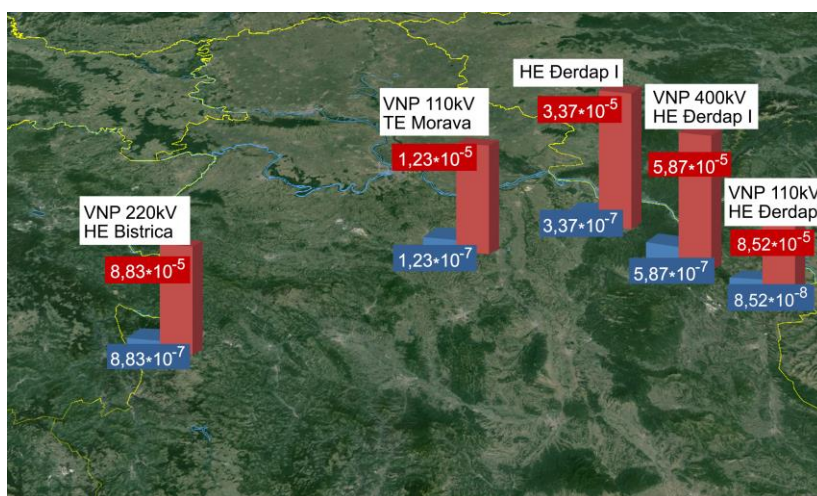
Tabela 7.13: Zavisnost rizika  $R_D$  od broja gromobranskih elemenata

<i>Broj zaštitnih užadi</i>	<i>C</i>	<i>R<sub>D</sub></i>
1	0,833	$6,91 \cdot 10^{-5}$
2	0,666	$5,81 \cdot 10^{-5}$
3	0,499	$4,4 \cdot 10^{-5}$
4	0,332	$3,02 \cdot 10^{-5}$
5	0,165	$1,94 \cdot 10^{-5}$
6	0	$9,13 \cdot 10^{-6}$

Na osnovu rezultata datih u tabeli 7.13 može se zaključiti da je rizik u dozvoljenim granicama, odnosno zadovoljava izraz (4.8), u slučajevima kada je kao prihvatni sistem gromobranske instalacije upotrebljeno svih šest zaštitnih užeta, što se u ovom slučaju poklapa i sa vizualizacijom zone zaštite prikazane na slici 7.47.

Sumiranjem svih rezultata dobijenih na konkretnim primerima HE "Đerdap 1", TE "Morava" i HE "Bistrica" mogu se rezultati prikazati regionalno, kao što je prikazano na slici 7.53. Mapu rizika moguće je proširiti za sva postrojenja koja se nalaze u sklopu EES-a Republike Srbije i tako imati kompletnu sliku rizika kvara od mogućih atmosferskih pražnjenja.

Sa slike 7.53 može se zaključiti da se svi rizici kvara usled direktnog atmosferskog pražnjenja u postrojenje, pri pravilno izvedenoj gromobranskoj instalaciji ( $R_{Dmax}$ ) nalaze u dozvoljenim granicama koje su opisane izrazom 4.8. Dalje se može zaključiti i to da se svi rizici kvara usled direktnog atmosferskog pražnjenja u postrojenje, pri nepravilno izvedenoj gromobranskoj instalaciji ( $R_{Dmin}$ ) nalaze u nedozvoljenim granicama koje su veće od vrednosti opisane izrazom (4.8).



Slika 7.53: Mapa rizika za deo postrojenja u sklopu EES Republike Srbije

Najveći rizici od direktnog atmosferskog pražnjenja  $R_D$  su dobijeni za HE "Bistrica" i njeno pripadajuće postrojenje. Ova činjenica je povezana sa najvećim brojem grmljavinskih dana i brdovitom lokacijom na kojoj je izgrađena HE "Bistrica".

## 7.4 Primer vetroelektrane

### 7.4.1 Procena rizika kvara od direktnog atmosferskog pražnjenja u vetroelektranu i pripadajuće postrojenje

U nastavku disertacije je prikazan postupak procene rizika kvara od atmosferskog pražnjenja za konkretnu vetroelektranu koja se sastoji od devet vetroturbina, tipa Vestas V100-2 MW, visine stuba 95 m i dužine lopatica 50 m [96].

Na slici 7.54 prikazana je maska softverskog alata "Risk Management and cost effective for WT" popunjena sa konkretnim podacima koji opisuju vetroelektranu.

Slika 7.54: Rizici i štete nastale prilikom atmosferskog pražnjenja u vetroturbinu, tipa Vestas V100-2 MW



Za potrebe procene rizika kvara vetroturbine od atmosferskog pražnjenja razvijen je softverski alat "*Risk Management and cost effective for WT*" koji omogućava automatizaciju proračuna datih u poglavlju 5, a odnosi se na konkretnu vetroturbinu Vestas V100-2 MW.

Za obeleženu lokaciju na mapi korisnik automatski očitava izokeraunički nivo  $T_d$ . U cilju procene rizika i troškova gubitaka unosi se odgovarajuća struja atmosferskog pražnjenja na osnovu koje se određuje i ispisuje nivo zaštite. Sledi definisanje visine vetroturbine za koju se proračunava prihvatna površina  $A$ .

Pritiskom na dugme "*Proračun*" dobijaju se u nastavku vrednosti za  $N_D$ ,  $N_L$  i  $N_I$  (izrazi 5.11, 5.13 i 5.14). Sledi unos podataka o proceni verovatnoće nastalih šteta usled atmosferskog pražnjenja u vetroturbinu, nakon čega se pritiskom na dugme *Proračun*, izračunavaju odgovarajući pojedinačni i zbirni rizici kvara (tabela 7.14). Nakon toga se popunjavaju vrednosti za odgovarajuće troškove  $C_B$ ,  $C_A$ ,  $C_S$ ,  $C_C$  i  $C_P$  i proračunavaju se vrednosti za  $C_L$ ,  $C_{RL}$  i  $S$  (izrazi 5.26, 5.27 i 5.29).

Vrednost za trošak ukupnih gubitaka  $C_L$  se proračunava kada se u odgovarajuća polja za *Proračun odgovarajućih verovatnoća nastalih šteta* (slika 7.54) izaberu stavke bez prisustva gromobranske instalacije. Vrednost za ukupan trošak ostalih gubitaka uprkos merama zaštite  $C_{RL}$  se proračunava kada se u odgovarajuća polja za *Proračun odgovarajućih verovatnoća nastalih šteta* (slika 7.54) izaberu stavke sa prisustvom gromobranske instalacije odgovarajućih nivoa.

Za konkretnu vetroturbinu Vestas V100-2 MW, visine stuba 95 m i dužine lopatica 50 m pomoću softverskog alata proračunati su rizici i ekonomska isplativost, a rezultati su prikazani na slici 7.54.

U tabeli 7.14 dati su ulazni i izlazni podaci za konkretnu vetroelektranu. Proračun je izvršen za projektovanje vetroelektrane na području gde je broj grmljavinskih dana na godišnjem nivou  $T_d = 37$ .

Vrednost  $R_C$  koja predstavlja rizik da će atmosfersko pražnjenje u dalekovod koji je povezan sa vetroturbinom, da izazove oštećenje opreme vetroturbine, ne zadovoljava uslov dat izrazom (5.24).

Tabela 7.14: Ulazni podaci i rezultati procene rizika kvara i ekonomske dobiti za konkretnu vetroelektranu

<i>Ulazni podaci</i>		<i>Rezultati</i>	
$T_d$	37	$N_D$	1,89
Nivo zaštite objekta	I	$N_L$	0,38
$C_d$	2	$N_I$	1,89
$C_t$	0,2	$R_V$	$0,75 \cdot 10^{-6}$
$C_e$	1	$R_B$	$0,75 \cdot 10^{-5}$
$A \text{ (m}^2\text{)}$	255046	$R_W$	$0,38 \cdot 10^{-5}$
		$R_C$	$1,89 \cdot 10^{-5}$
$P_B$	0,02	$R_Z$	0
$P_C$	0,01	$R_A$	$0,19 \cdot 10^{-5}$
$P_A$	0,01	$R_U$	$0,38 \cdot 10^{-6}$
$r_p$	0,2	$R_O$	$2,26 \cdot 10^{-5}$
$r_f$	0,1	$R_D$	$0,64 \cdot 10^{-5}$
$r_a, r_u$	0,01	$R_F$	$0,83 \cdot 10^{-5}$
$C_B(\text{NJ})$	500	$R_I$	$2,68 \cdot 10^{-5}$
		$R_S$	$0,23 \cdot 10^{-5}$
$C_S(\text{NJ})$	1500	$C_{PM}(\text{NJ})$	5
$C_C(\text{NJ})$	100	$C_L(\text{NJ})$	5,67
$C_P(\text{NJ})$	50	$C_{RL}(\text{NJ})$	0,06
$C_A(\text{NJ})$	50	$S(\text{NJ})$	0,61

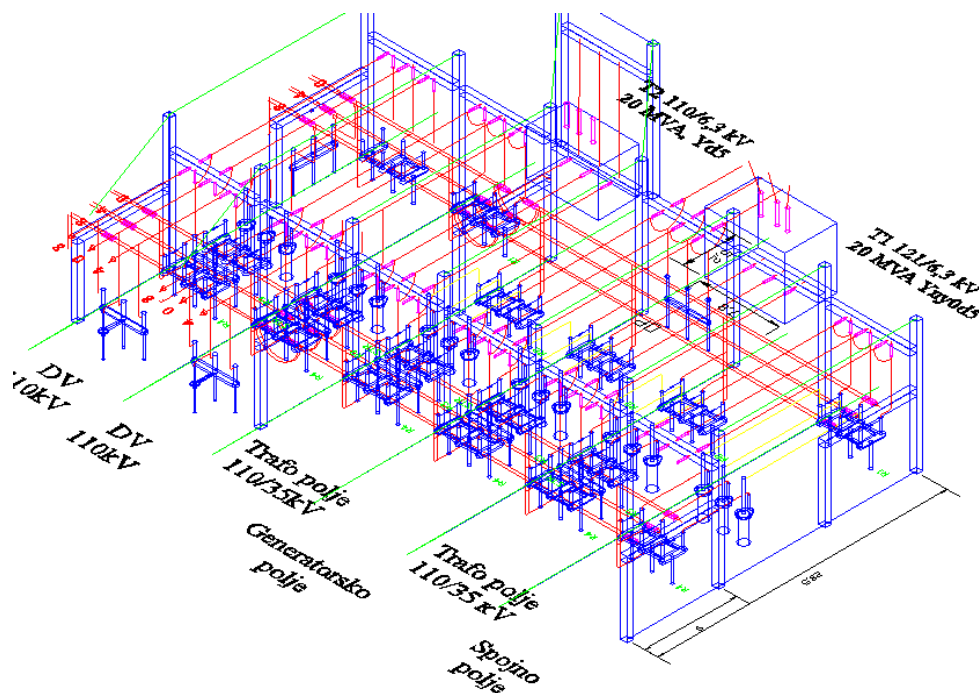
Iz tabele 7.14 se može zaključiti da je u većoj meri ispunjen uslov dat izrazom (5.24) odnosno da se pojedinačni i ukupni rizici nalaze u opsegu koji je manji od tolerisanog prema [91].

Uslov (5.24) ne zadovoljavaju vrednosti za dobijene rizike  $R_C$ ,  $R_O$  i  $R_I$ . Vrednost rizika  $R_O$  koji predstavlja rizik od otkaza elektronskih sistema (energetskih pretvarača i ostale elektronike) nije u dozvoljenim granicama. Rizik  $R_I$  koji predstavlja rizik od atmosferskog pražnjenja u blizinu vetroturbine, takođe nije u dozvoljenim granicama. Sve ostale vrednosti rizika  $R_W$ ,  $R_A$ ,  $R_O$ ,  $R_D$ ,  $R_F$ ,  $R_I$ ,  $R_S$  zadovoljavaju uslov (5.24).

Bitna činjenica je da je ukupan rizik  $R_D$ , da će direktno atmosfersko pražnjenje u vetroturbinu da izazove bilo kakvu štetu, u tolerantnim granicama koje su definisane izrazom (5.24). Činjenica da rizici  $R_C$ ,  $R_O$  i  $R_I$  ne zadovoljavaju uslov dat izrazom (5.24) može se tumačiti visokom vrednošću grmljavinskih dana na konkretnoj lokaciji kao i velikom vrednošću za prihvatnu površinu  $A$  pošto su vetroturbine objekti vrlo velikih visina.

Za pretpostavljene vrednosti troškova  $C_B$ ,  $C_S$ ,  $C_C$  i  $C_P$ , čije je značenje objašnjeno u poglavlju 5.3, dobijaju se zadovoljavajuće vrednosti za  $S$  (izraz 5.29), što govori u prilog tome da je gromobranska instalacija analizirane vetroelektrane ekonomski isplativa.

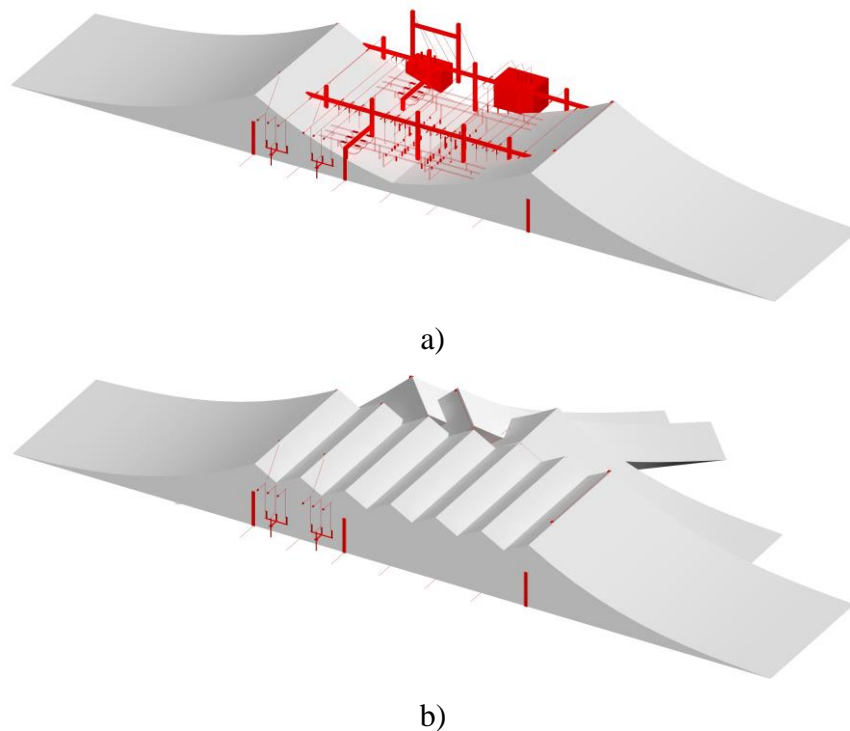
Razmatrana vetroelektrana je povezana sa pripadajućim postrojenjem 110 kV. Žičani model postrojenja 110 kV realizovan je u AutoCAD-u i prikazan na slici 7.55.



Slika 7.55: Žičani model pripadajućeg 110 kV postrojenja pri vetroelektrani

Slika 7.55 je predstavljena sa uveličanim detaljima u prilogu kao slika 10.28. Pripadajuće postrojenje 110 kV sadrži dva transformatorska polja, svaki snage po 20 MVA i dva distributivna voda nazivnog napona od 110 kV. Prihvatni sistem gromobranske instalacije postrojenja 110 kV realizovan je pomoću 10 zaštitnih užadi visine 13 m.

Na slikama 7.56 a) i 7.56 b) prikazani su renderovani modeli zone zaštite gromobranske instalacije kada je zona zaštite realizovana sa dva i sa svih deset zaštitnih užadi respektivno. Prikazana zona zaštite je realizovana za vrednost struje atmosferskog pražnjenja  $I = 33$  kA i prema izrazima predloženih od strane autora Love [3].



Slika 7.56: Renderovan model ostvarene zone zaštite pripadajućeg postrojenja: a) ostvarene pomoću dva zaštitna užeta; b) ostvarene pomoću deset zaštitnih užadi

Crvenom bojom je predstavljen deo postrojenja koji nije u zoni zaštite gromobranske instalacije. Ostvarena zona zaštite predstavljena je sivom bojom. Sa slike 7.56 a) može se zaključiti da upotrebom dva zaštitna užeta veliki deo postrojenja ostaje nezaštićen od atmosferskog pražnjenja.

Na osnovu slike 7.56 b) može se zaključiti da je primenom deset zaštitnih užadi realizovana efikasna zona zaštite postrojenja. Na slici 7.57 je prikazana maska softverskog alata za proračun rizika i troškova "*Risk management and cost effective by IEC 62305*" usled mogućeg atmosferskog pražnjenja u pripadajuće postrojenje.

Risk Management and cost effective by IEC-62305-2

**Određivanje nivoa zaštite**

Struja atm. pražnjenja

Mapa izokerauničkog nivoa

**Uticaj okoline na VNP**

WNP u brdima

Postojanje blok transformatora

Seoska okolina

**Proračun broja atm. pražnjenja**

$N_D$

$N_L$

$N_I$

**Proračun**

**Dimenzije VNP**

Dužina L(m)  **Dodaj**

Širina W(m)  **Reset**

Visina H(m)  **A**

**Pror. odgovarajućih verov. nastalih šteta**

Objekat sa gromobranskom zast

Objekat sa gromobranskom zast

**Pror. odgov. gub. uzrokovanih atmosf. praž**

Postojanje jedne od sledećih me

Eksplzija

L<sub>b</sub>=L<sub>v</sub>  L<sub>c</sub>=L<sub>w</sub>=L<sub>z</sub>=L<sub>o</sub>

**Procena pojedinačnih rizika**

$R_V$    $R_Z$

$R_B$    $R_C$

$R_W$   **Proračun**

**Procena ukupnog rizika**

$R_F$    $R_D$

$R_O$    $R_I$

**Procena isplativosti gromobranske instalacije**

Nabavna vrednost objekta	$C_B(NJ)$ <input type="text" value="200000"/>	Uneti 0 za štetu bez grom. instalacije i 1 za štetu sa grom. instalacijom	<input type="text" value="1"/>	
Nabavna vrednost opreme u elektrani	$C_S(NJ)$ <input type="text" value="600000"/>		Šteta nastala atm. praž. ako ne postoji gromobranska instalacija	$C_L(NJ)$ <input type="text" value="529"/>
Nabavna vrednost visokonap. elem. u VNP	$C_C(NJ)$ <input type="text" value="200000"/>		Šteta nastala atm. praž. ako postoji gromobranska instalacija	$C_{RL}(NJ)$ <input type="text" value="5.12"/>
Nabavna vrednost grom. elemenata	$C_P(NJ)$ <input type="text" value="700"/>		Ušteda novca na godišnjem nivou upotrebom gromobranske instalacije	$S(NJ)$ <input type="text" value="253.88"/>
Ukupni godišnji troškovi održavanj gromobranske instalacije	$C_{PM}(NJ)$ <input type="text" value="70"/>		Gromobranska instalacija je ekonomski isplativa	<b>Proračun</b>

Slika 7.57: Rizici i štete nastale usled atmosferskog pražnjenja u pripadajuće postrojenje

U tabeli 7.15 dati su ulazni i izlazni podaci proračuna rizika i troškova kvara od atmosferskog pražnjenja za pripadajuće postrojenje 110 kV koje povezuje vetroelektranu sa distributivnom mrežom. Za konkretnu lokaciju gde je planirana izgradnja vetroelektrane sa pripadajućim postrojenjem, broj grmljavinskih dana je veći zbog brdovitog terena, što je slučaj i sa lokacijom HE "Bistrica". Ova činjenica objašnjava jednim delom i nešto veće vrednosti rizika od atmosferskog pražnjenja u vetroelektrinu i/ili pripadajuće postrojenje.

Na osnovu rezultata prikazanih u tabeli 7.15 se može zaključiti da su za posmatrano pripadajuće postrojenje pri vetroelektrani, pojedinačni i zbirni rizici u granicama definisanim izrazom (4.8). Isto tako se može zaključiti i da je gromobranska instalacija odgovarajuća sa ekonomskog aspekta jer je ispunjen uslov  $S > 0$  (izraz 4.20).

Iz analiziranih vrednosti rizika vetroelektrane i pripadajućeg postrojenja može se zaključiti da atmosfersko pražnjenje u dalekovod ili u neposrednu blizinu vetroelektrane

može da izazove oštećenje opreme u okviru iste dok atmosfersko pražnjenje u postrojenju ne može da izazove nikakvo oštećenje u okviru njega.

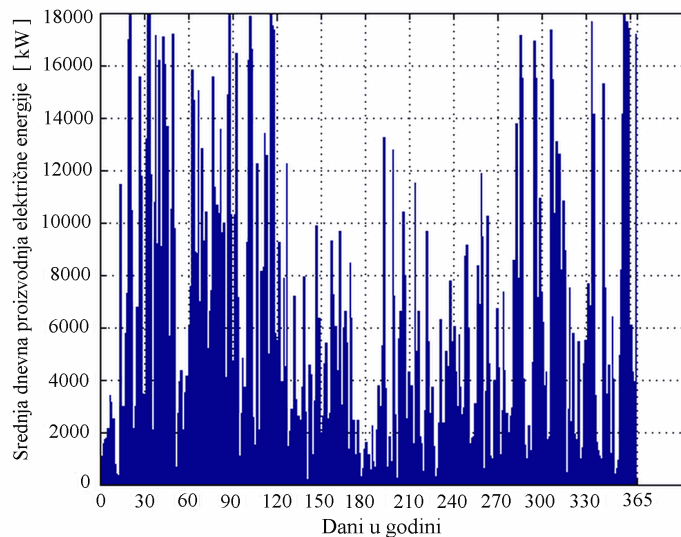
Tabela 7.15: Ulazni podaci i rezultati procene rizika i troškova kvara za konkretno postrojenje

<i>Ulazni podaci</i>		<i>Izlazni podaci</i>	
$T_d$	37	$N_D$	0,091388
		$N_L$	0,018277
$C_d$	2	$N_I$	0,00914
$C_t$	0,2	$R_V$	$3,65 \cdot 10^{-7}$
$C_e$	1	$R_B$	$3,65 \cdot 10^{-6}$
$A \text{ (m}^2\text{)}$	12349,7	$R_W$	$1,83 \cdot 10^{-7}$
		$R_C$	$9,14 \cdot 10^{-7}$
$P_B$	0,02	$R_Z$	0
$P_C$	0,01	$R_O$	$1,1 \cdot 10^{-6}$
$r_p$	0,2	$R_D$	$5,48 \cdot 10^{-7}$
$r_f$	1	$R_F$	$4,02 \cdot 10^{-6}$
$C_S(\text{MU})$	600000	$R_I$	$4,56 \cdot 10^{-6}$
$C_B(\text{MU})$	200000	$C_L(\text{MU})$	329
$C_C(\text{MU})$	200000	$C_{RL}(\text{MU})$	5,12
$C_P(\text{MU})$	700	$S(\text{MU})$	253,99

#### 7.4.2 Procena neisporučene energije usled direktnog atmosferskog pražnjenja u vetroturbinu unutar vetroelektrane ili u pripadajuće postrojenje

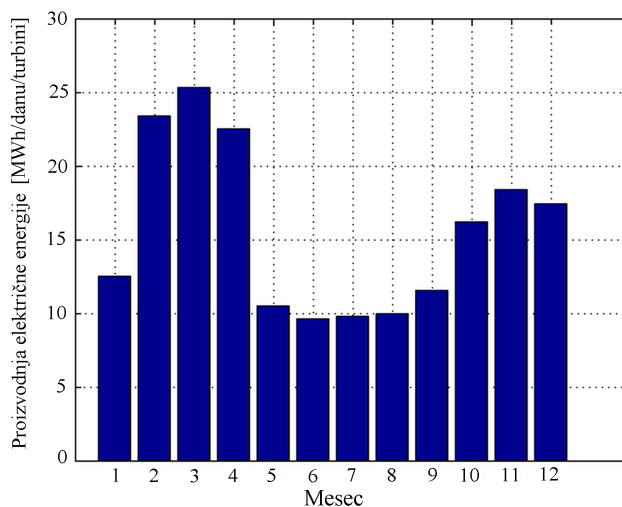
Metodologija procene gubitka proizvodnje usled atmosferskog pražnjenja u vetroturbinu, koja je prezentovana u poglavlju 5, je demonstrirana na primeru perspektivne vetroelektrane u južnom Banatu. Procena proizvodnje vetroelektrane je izvršena na osnovu namenskih merenja brzine vetra koja su sprovedena u toku 2009. godine na lokaciji planirane vetroelektrane. Merenja brzine vetra su vršena na visinama 10, 40, 50 i 60 m. Ekstrapolacija mernih podataka o brzini vetra na visini osovine vetroturbine,  $H = 95 \text{ m}$ , je vršena primenom metodologije opisane u radu [97]. Procena snage proizvodnje pojedinih vetroturbina je vršena na osnovu raspoložive krive snage za odabrani model vetroturbine Vestas V100, 2 MW. S obzirom da je u pitanju vrlo ravan teren sa homogenom hrapavošću, u pogledu prostorne raspodele potencijala vetra uvažavan je samo tzv. "wake efekat".

Korišćenjem jednogodišnjih mernih podataka i opisane metodologije izvršena je procena proizvodnje pretpostavljene vetroelektrane za svaki desetominutni interval u toku 2009. godine. Na slici 7.58 predstavljeni su rezultati proračuna srednjih dnevnih snaga proizvodnje analizirane vetroelektrane. Redni broj odgovarajućeg dana u godini, koji su predstavljeni na x osi, su računati u odnosu na 01. 01. 2009. godine.



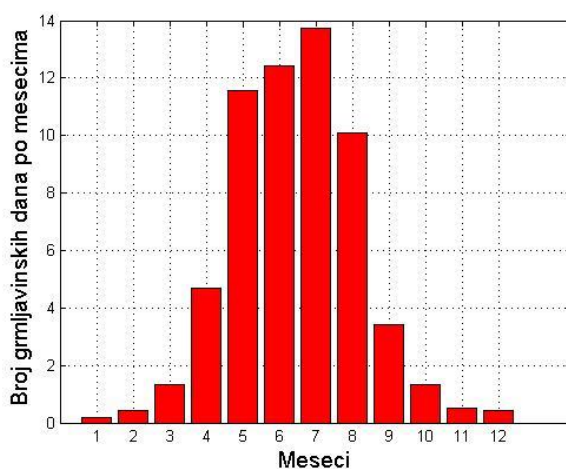
Slika 7.58: Srednja dnevna snage proizvodnje analizirane vetroelektrane u toku 2009. godine

Na slici 7.59 prikazani su rezultati proračuna snage proizvodnje jedne vetroturbine u analiziranoj vetroelektrani za prosečan dan u toku svakog meseca u toku 2009. godine.



Slika 7.59: Proizvodnja električne energije vetroturbine u analiziranoj vetroelektrani po mesecima u toku 2009. godine

Analizirani region karakteriše vetrovit period oktobar – april, kada najčešće duva jugoistočni vetar Košava. U tom periodu proizvodnja je značajno veća nego u toku letnjih meseci. Atmosfersko pražnjenje u vetroturbinu, koje bi se desilo u toku vetrovitijeg perioda, bi dovelo do većeg gubitka energije, odnosno neproizvedene energije, nego pražnjenje u letnjem periodu. Iz tog razloga, za procenu efekata atmosferskog pražnjenja na gubitak proizvodnje vetroelektrane potrebno je analizirati i grmljavinsku aktivnost po mesecima. Na slici 7.60 prezentovani su podaci o prosečnom broju grmljavinskih dana u regionu analizirane vetroelektrane za dvadesetogodišnji period 1994-2013 [92].



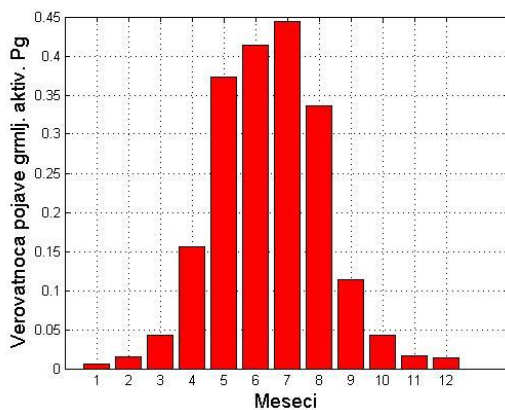
Slika 7.60: Prosečan broj grmljavinskih dana po mesecima

Uporednom analizom slika 7.59 i 7.60, može se zaključiti da je u vetrovitijem periodu godine, kada je proizvodnja vetroelektrane značajno manja, grmljavinska aktivnost manje izražena nego u letnjem periodu. Ovo pogoduje u pogledu rizika od neproizvedene energije zbog atmosferskog pražnjenja u vetroturbinu ili postrojenje pri vetroelektrani. Npr. atmosfersko pražnjenje u jednu vetroturbinu u toku jula meseca, kada je zabeležena najveća grmljavinska aktivnost, bi prouzrokovalo gubitak energije od oko 10 MWh/danu/turbini, dok bi atmosfersko pražnjenje u martu, izazvalo ispad oko 25 MWh/danu/turbini.

Ukoliko bi atmosfersko pražnjenje dovelo do ispada celog postrojenja, onda bi u analiziranom slučaju, gubitak energije bio devet puta veći. Takođe treba imati u vidu da trajanje ispada vetroturbine od trenutka atmosferskog pražnjenja do trenutka ponovnog puštanja u rad zavisi od posledica atmosferskog pražnjenja. Svako atmosfersko

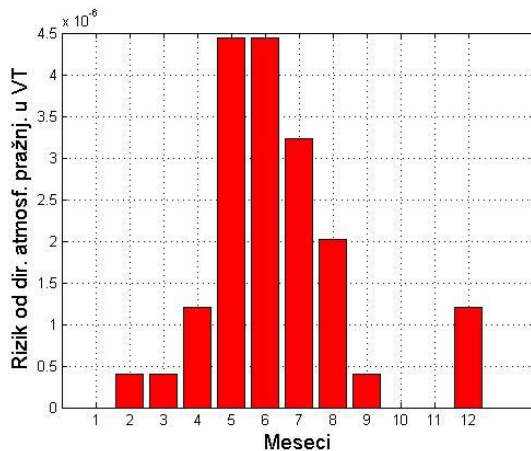


pražnjenje zahteva zaustavljanje vetroturbine i njenu inspekciju. Dok se ne utvrde kvarovi, vetroturbina se može naći van pogona i više dana. Na osnovu dvadesetogodišnjeg perioda 1994-2013 [92] mogu se dobiti prosečne vrednosti verovatnoća pojave grmljavinske aktivnosti na mesečnom nivou  $P_g$ . Verovatnoća  $P_g$  u zavisnosti od konkretnog meseca i konkretne lokacije prikazana je na slici 7.61.



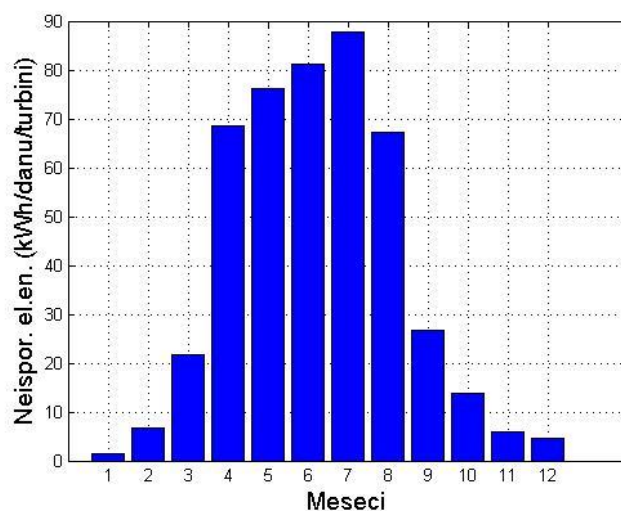
Slika 7.61: Verovatnoća pojave grmljavinske aktivnosti na mesečnom nivou  $P_g$

Korišćenjem podataka o broju grmljavinskih dana na mesečnom nivou za posmatranu 2009. godinu može se pomoću softverskog alata "*Risk management and cost effective for WT*" za procenu rizika kvara od atmosferskog pražnjenja u vetroturbinu, odrediti vrednost rizika od direktnog atmosferskog pražnjenja u vetroturbinu  $R_D$ . Na slici 7.62 su prikazane vrednosti rizika od direktnog atmosferskog pražnjenja u vetroturbinu ( $R_D$ ) na mesečnom nivou, za posmatranu 2009. godinu i posmatranu lokaciju.



Slika 7.62: Vrednosti rizika od direktnog atmosferskog pražnjenja ( $R_D$ ) u vetroturbinu na mesečnom nivou

Na osnovu izraza 5.31 i vrednosti za isporučenu električnu energiju na mesečnom nivou po vetroturbini (slika 7.59) može se proceniti vrednost neisporučene električne energije usled direktnog atmosferskog pražnjenja u vetroturbini na mesečnom nivou. Na slici 7.63 je prikazana vrednost neisporučene električne energije po vetroturbini usled atmosferskog pražnjenja u vetroturbini.

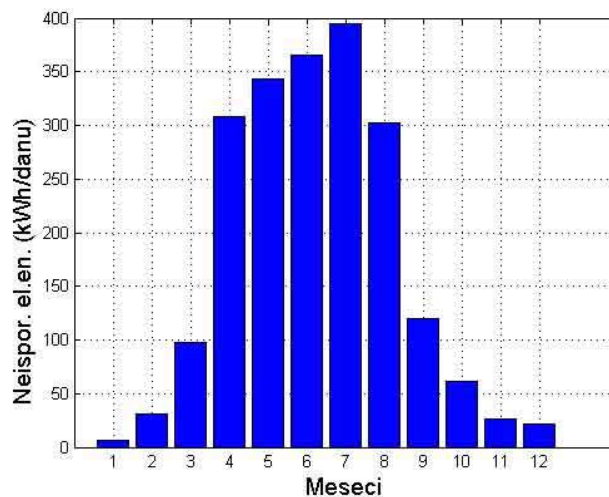


Slika 7.63: Neisporučena električna energija prosečne vetroturbine za prosečan dan po mesecima

Analizirajući grafikon prikazan na slici 7.62 može se zaključiti da neisporučena električna energija usled direktnog atmosferskog pražnjenja u vetroturbini prati grafikon prosečnog broja grmljavinskih dana po mesecima za dvadesetogodišnji period (slika 7.60) i verovatnoću pojave grmljavinske aktivnosti na mesečnom nivou  $P_g$  u zavisnosti od konkretnog meseca i lokacije (slika 7.61). Zanimljiva je činjenica da neisporučena električna energija ne zavisi u velikoj meri od količine proizvedene električne energije (slika 7.59) koliko od same grmljavinske aktivnosti.

Direktna atmosferska pražnjenja u visokonaponske elemente priključnog postrojenja su naročito opasna jer mogu dovesti do ispada celokupne vetroelektrane. U tom slučaju pri ispadu celog postrojenja svih devet jedinica vetroelektrane neće isporučivati električnu energiju u mrežu.

Vrednost neisporučene električne energije usled direktnog atmosferskog pražnjenja u elemente postrojenja na mesečnom nivou proračunava se pomoću izraza 5.32 objašnjenog u poglavlju 5 (slika 7.64).



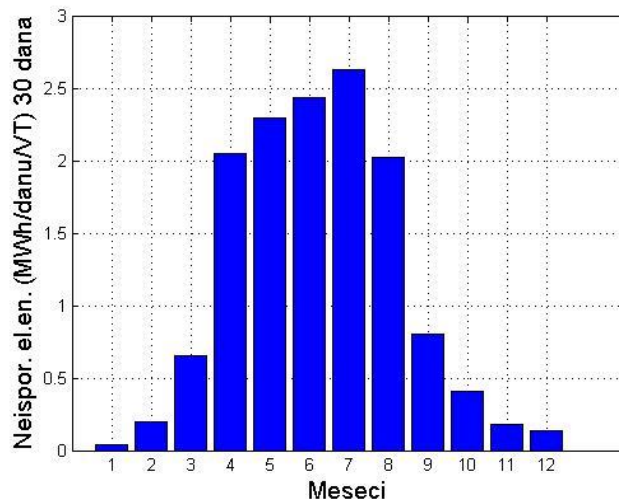
Slika 7.64: Neisporučena električna energija pripadajućeg postrojenja za prosečan dan po mesecima u toku 2009. godine

Analizirajući grafik prikazan na slici 7.64 može se zaključiti da neisporučena električna energija usled direktnog atmosferskog pražnjenja u postrojenje prati grafikon prosečnog broja grmljavinskih dana po mesecima za dvadesetogodišnji period (slika 7.60) i verovatnoću pojave grmljavinske aktivnosti na mesečnom nivou  $P_g$  u zavisnosti od konkretnog meseca i lokacije (slika 7.61). I u ovom slučaju neisporučena električna energija, prikazana na slici 7.64, ne zavisi u velikoj meri od proizvedene električne energije vetroelektrane koliko od grmljavinske aktivnosti na konkretnoj lokaciji.

Vrednosti neisporučene električne energije, na dnevnom nivou i po vetroturbini, su 4÷5 puta veće kada dođe do ispada celog postrojenja, što se može zaključiti sa slika 7.63 i 7.64. To se može objasniti činjenicom da pri ispadu postrojenja dolazi do obustave rada svih devet vetroturbina u okviru vetroelektrane.

Ukoliko direktno atmosfersko pražnjenje u vetroturbini prouzrokuje oštećenje, pristupa se zaustavljanju iste i otklanjanju kvarova. Od perioda otklanjanja kvarova zavisi i količina neisporučene električne energije. Na primer, ako je period otklanjanja kvarova 30 dana, pri oštećenju jedne vetroturbine, tada vrednost neisporučene električne energije za juli mesec iznosi 2,64 MWh. S obzirom na činjenicu da su proračuni urađeni za najefikasniju moguću gromobranksku instalaciju vetroturbine i postrojenja, vrednost neisporučene električne energije nije zanemarljiva. Ova činjenica samo govori u prilog tome da ne postoji potpuna gromobrankska zaštita objekata posebne namene kakve su vetroturbine sa pripadajućim postrojenjem.

Na slici 7.65 je prikazana zavisnost neisporučene električne energije, po mesecima, ako direktno atmosfersko pražnjenje izazove ispad jedne vetroturbine, a period popravke je 30 dana.



Slika 7.65: Zavisnost neisporučene električne energije jedne vetroturbine, po mesecima, za period popravke od 30 dana

Sa slike 7.65 se može zaključiti da vrednost neisporučene električne energije nije zanemarljiva kada se u obzir uzme duži vremenski period. Najveća vrednost za neisporučenu električnu energiju se, kako je i očekivano, ostvaruje u julu mesecu kada je i zabeležena najveća grmljavinska aktivnost za analiziranu lokaciju. Neisporučena električna energija u julu mesecu za jednu vetroturbinu iznosi oko 2,6 MWh, a ako bi se desilo atmosfersko pražnjenje u postrojenje onda bi neisporučena električna energija za period od 30 dana bila devet puta veća i iznosila bi 23,4 MWh.

Iz prethodnih analiza i rezultata se može zaključiti da atmosfersko pražnjenje u vetroturbinu ili pripadajuće postrojenje jedne vetroelektrane može da ima više negativnih posledica. Prva posledica je izazivanje kvara na delu (delovima) opreme i prouzrokovanje ekonomske štete koja mora da se nadoknadi. Druga posledica je ekonomski gubitak usled neisporučene energije koji se ne ogleda samo u nedostatku profita koji se na taj način ostvaruje, već i u niskoj pouzdanosti pri isporuci električne energije.

## 8. ZAKLJUČAK

Pouzdanost rada postrojenja koja su u praksi često izložena direktnim atmosferskim pražnjenjima u velikoj meri utiče na pouzdanost rada celokupnog EES-a. Modelovanje zone zaštite predstavlja važan korak u analizi ugroženosti postrojenja od direktnog atmosferskog pražnjenja.

Glavni doprinosi doktorske disertacije su:

1. *Formiranje generičkog modela proračuna zone zaštite štapne hvataljke i zaštitnog užeta po metodi kotrljajuće sfere.* Proračun zone zaštite predstavlja važan korak u analizi ugroženosti postrojenja od direktnog atmosferskog pražnjenja. Na osnovu formiranog generičkog modela u disertaciji je analizirana i modelovana zona zaštite za konkretna postrojenja koja se nalaze pri HE "Đerdap 1", HE "Bistrica", TE "Morava" i pripadajuće postrojenje pri vetroelektrani. Analizom zone zaštite su obuhvaćena postrojenja naponskih nivoa 400 kV, 220 kV i 110 kV. U disertaciji je analiziran uporedni prikaz zone zaštite postrojenja primenom geometrijskog i generičkog modela. Analiziran je prikaz poluprečnika (širine) zone zaštite  $r_x$  za dve karakteristične visine 0 m i 2 m, koje predstavljaju nivo tla i nivo visine čoveka. Primenom generičkog modela ostvaruje se veća zona zaštite realizovana štapnom hvataljkom, na 0 m visine od geometrijskog modela za 63%, dok za zaštitno uže ta razlika iznosi 252,3 %. Na 2 m visine primena generičkog modela ostvaruje veću zonu zaštite realizovanu štapnom hvataljkom od geometrijskog modela za 33,6% dok za zaštitno uže ta razlika iznosi 167 %. Primena generičkog modela je doprinela ostvarenju veće zone zaštite postrojenja od direktnog atmosferskog pražnjenja u odnosu na geometrijski model, što je posebno uočljivo pri korišćenju zaštitnog užeta.

Analizom uporednog prikaza zone zaštite promenom izraza za izračunavanje udarnih rastojanja unutar generičkog modela došlo se do zaključka da su poluprečnici zone zaštite  $r_x$  štapne hvataljke na 0 m visine, najveći u izrazu predloženom od strane WG CIGRE i to za 16,5 % u odnosu na IEEE, 10 % u odnosu na Young i 2,5 % u odnosu na Love. Ako se koriste izrazi za širinu zone zaštite  $r_x$  za zaštitno uže, razlike su nešto veće i to WG CIGRE rezultuje većim vrednostima za  $r_x$  u odnosu na IEEE za 21,6 %, u odnosu na Young za 13,7 %, i u odnosu na Love za 7 %. Poluprečnici zone zaštite  $r_x$  štapne hvataljke na 2 m visine, najveći su u izrazu predloženom od strane autora WG CIGRE i to za 21 % u odnosu na IEEE, 13 % u odnosu na Young i 6 % u

odnosu na Love. Ako se koriste izrazi za zaštitno uže razlike su nešto veće i to WG CIGRE rezultira sa  $r_x$  većim u odnosu na IEEE za 28 %, u odnosu na Young za 18 %, i u odnosu na Love za 12 %.

Analizom uporednog prikaza zone zaštite prema generičkom modelu pri amplitudama struja atmosferskog pražnjenja od 200 kA u odnosu na 33 kA, može se zaključiti da dolazi do povećanja zone zaštite. Znači da je postrojenje teže štititi od manjih struja nego od većih. Zaključuje se da se sa porastom struje atmosferskog pražnjenja od 560 %, povećava poluprečnik (širina) zone zaštite za 122 % na 0 m visine i za 143 % na 2 m visine.

### *2. Modelovanje zone zaštite postrojenja od direktnog atmosferskog pražnjenja.*

Na osnovu proračuna udarnog rastojanja na bazi generičkog modela modelovane su zone zaštite gromobranske instalacije sledećih postrojenja: 400 kV HE "Đerdap 1", 110 kV HE "Đerdap 1", 220 kV HE "Bistrica", 110 kV TE "Morava" i 110 kV pripadajućeg postrojenja vetroelektrane. Efikasnom tehnikom renderovanja omogućen je jasan prikaz delova postrojenja koji su zaštićeni ili nezaštićeni od direktnog atmosferskog pražnjenja. Izveden je zaključak da je sa aspekta ostvarene zone zaštite gromobranske instalacije, koja je prikazana primenom novog generičkog modela, trenutno realno stanje nabrojanih postrojenja zadovoljavajuće.

### *3. Formirana je metodologija i algoritam za proračun rizika kvara i troškova gubitaka postrojenja usled direktnog atmosferskog pražnjenja primenom fuzzy logike.*

Primenom fuzzy logike kao alata veštačke inteligencije opisane su neodređenosti između ostvarene zone zaštite gromobranske instalacije i rizika kvara usled direktnog atmosferskog pražnjenja u postrojenje. Primenom razvijenog softverskog alata za procenu rizika kvara od atmosferskog pražnjenja u postrojenje "*Risk management and cost effective by IEC 62305*" izračunate su vrednosti za pojedinačne i zbirne rizike kvara za konkretna postrojenja. Konkretno vrednosti za rizike od direktnog atmosferskog pražnjenja  $R_D$  izračunate su za postrojenja: 400 kV HE "Đerdap 1", 110 kV HE "Đerdap 1", 220 kV HE "Bistrica" i 110 kV TE "Morava". Proračunati su rizici od direktnog atmosferskog pražnjenja pri potpunom prisustvu gromobranske instalacije  $R_{Dmin}$  i pri potpunom odsustvu gromobranske instalacije  $R_{Dmax}$  i na osnovu tih vrednosti formiran je algoritam fuzzy odlučivanja za konkretna postrojenja. Na osnovu primene fuzzy

logike povezane su neodređenosti između rizika od direktnog atmosferskog pražnjenja i ostvarene zone zaštite i došlo se do sledećih zaključaka:

- 3.1 Rizici od direktnog atmosferskog pražnjenja u postrojenja: 400 kV HE "Đerdap 1", 110 kV HE "Đerdap 1", 220 kV HE "Bistrica" i 110 kV TE "Morava" su u tolerisanim granicama prema IEC 62305 i pri ovim vrednostima rizika je vizuelno ustanovljeno da ostvarena zona zaštite pruža u potpunosti zaštitu postrojenja.
- 3.2 Moguće je pri vizuelno ostvarenoj nepotpunoj zoni zaštite (80÷100 %) dobiti rizike kvara od direktnog atmosferskog pražnjenja koji su u tolerantnim granicama. U ovim okolnostima se može zaključiti da samo ispunjenje i uslova dozvoljenog rizika i uslova potpune zone zaštite vodi ka efikasno projektovanoj gromobranskoj instalaciji postrojenja.
- 3.3 Proračunati rizici kvara od direktnog atmosferskog pražnjenja su prikazani na mapi Srbije sa lokacijama analiziranih postrojenja što omogućava formiranje mape rizika. Ovu mapu je moguće proširiti za sva postrojenja koja se nalaze u sklopu EES-a Republike Srbije čime bi se stekla kompletna slika rizika kvara od mogućih atmosferskih pražnjenja.
- 3.4 Rizici RD su veći kod postrojenja koja su lokacijski povezana sa brdovitim predelima kao što je slučaj sa postrojenjem 220 kV HE "Bistrica" i pripadajućim postrojenjem pri vetroelektrani. Veći rizici su povezani sa većim izokerauničkim nivoom.
- 3.5 Primena predložene metodologije i formiranih softverskih alata omogućava menadžmentu elektroprivrednih organizacija pravovremeno donošenje odgovarajućih odluka u vezi mera, obima i sredstava za gromobransku zaštitu visokonaponskog postrojenja.

*4. Formirane su i implementirane metodologija za procenu neisporučene električne energije usled direktnog atmosferskog pražnjenja u vetroturbinu ili u pripadajuće postrojenje i metodologija proračuna rizika kvara i troškova gubitaka.*

Metodologija proračuna rizika kvara usled direktnog atmosferskog pražnjenja u vetroturbinu prikazana je u zavisnosti od topografskih i klimatoloških karakteristika lokacija na kojoj se nalazi konkretna vetroelektrana sa pripadajućim postrojenjem. Prikazana je i metodologija proračuna neisporučene električne energije koja se zasniva

na proračunu prosečne verovatnoće pojave atmosferskog pražnjenja i verovatnoće da će direktno atmosfersko pražnjenje u vetroturbini izazvati ispad iste ili celog pripadajućeg postrojenja. Na osnovu proračunatog prosečnog broja grmljavinskih dana po mesecima za dvadesetogodišnji period od 1993 ÷ 2013 za meteorološku stanicu, koja je najbliža lokaciji instaliranja konkretne vetroelektrane, izvedeni su sledeći zaključci:

- 4.1 Rizici od direktnog atmosferskog pražnjenja u vetroturbini na mesečnom nivou su u dozvoljenim granicama prema IEC-61400-24.
- 4.2 Dobijene vrednosti za neisporučenu električnu energiju, na mesečnom nivou po jednoj vetroturbini, prate dijagram verovatnoće pojave grmljavinskih aktivnosti  $P_g$  i prosečan broj grmljavinskih dana po mesecima.
- 4.3 Dobijene vrednosti za neisporučenu električnu energiju na mesečnom nivou pripadajućeg postrojenja prate dijagram verovatnoće pojave grmljavinskih aktivnosti  $P_g$  i prosečan broj grmljavinskih dana po mesecima.
- 4.4 Neisporučena električna energija je najveća u julu mesecu i za period popravke od 30 dana iznosi oko 2,6 MWh po jednoj vetroturbini. Za slučaj ispada celog postrojenja usled atmosferskog pražnjenja neisporučena električna energija za period od 30 dana bila bi devet puta veća kao posledica obustave rada svih devet vetroturbina u okviru vetroelektrane.



## 9. LITERATURA

- [1] IEC EN 62305-2, Protection against lightning, Part 2: Risk management, 2010.
- [2] IEEE Guide for Direct Lightning Stroke Shielding of Substations, IEEE Std 998–2012, 30. April 2013.
- [3] Hilleman A.R., Insulation Coordination for Power Systems, Marcel Dekker, New York, Basel, p. 275 – 306, 1999.
- [4] Delleria, L., and Garbagnati, E., Lightning Stroke Simulation by Means of the Leader Progression Model. Part I. Description of the Model and Evaluation of Exposure of Free-Standing Structures, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 5, p. 2009–2022, October 1990.
- [5] Savić, M.S., Stojković, Z., Tehnika visokog napona – atmosferski prenaponi, Monografija, II dopunjeno i izmenjeno izdanje, Elektrotehnički fakultet, Beograd, str. 532, Oktobar 2001.
- [6] Tehnička preporuka 25, Koordinacija izolacije u mrežama visokog napona, Združena elektroprivreda – Beograd, Služba za studije i istraživanja, Jun 1983.
- [7] IEEE Guide for Direct Lightning Stroke Shielding of Substations, IEEE Std 998-1996, The Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. New York, 1996.
- [8] Kostjenko. M. V. i saradnici, Tehnika visokog napona, Viša škola, Moskva, 1973. (na ruskom)
- [9] Anderson, J. G., chapter 12 of Transmission Line Reference Book 345 kV and Above, 2nd Ed. Rev. Palo Alto, CA: Electric Power Research Institute, 1987.
- [10] Anderson, R. B., and A. J. Eriksson, Lightning Parameters for Engineering Application, Electra, no. 69, p. 65–102, March 1980.
- [11] Anderson, R. B., Eriksson, A. J., Kroninger, H. D., Meal, V. and Smith, M. A. Lightning and Thunderstorm Parameters, IEEE Conference Publication no. 236, Lightning and Power Systems, London, p. 57–61, June 1984.
- [12] IEEE Std 1410TM-2010, IEEE Guide for Improving the Lightning Performance of Electric Power Overhead Distribution Lines, 2010.
- [13] Eriksson, A. J., Lightning and Tall Structures, Transaction South African IEE, Vol. 69, no. 8, p. 238–252, August 1978.

- [14] Muller-Hillebrand, D., On the Frequency of Lightning Flashes to High Objects, A Study on the Gulf of Bothnia, *Tellus*, Vol. 12, p. 444–449, 1960.
- [15] Stringfellow, M. F., Lightning incidence in the United Kingdom. *Instn. Elect. Engrs. Conf. Pub., Lightning and the Distribution System*, Vol. 108, p. 30–40, 1974.
- [16] Horn, F. W., and Ramsey, R. B. Cable Sheath Problems and Design, *Electronic Engineering*, Vol. 70, p. 1070–1075, 1951.
- [17] Anderson, J. G., Fisher, F. A. and Magnusson, E. E., Calculation of Lightning Performance of E.H.V. Lines, *EHV Transmission Line Reference Book*, New York: Edison Electric Inst., p. 285, 1968.
- [18] Brown, G. W., and Whitehead, E. R., Field and Analytical Studies of Transmission Line Shielding: Part II, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-88, p. 617–626, 1969.
- [19] Kolokolov, V. P., and Pavlova, G. P., Relations Between Some Thunderstorm Parameters, *Trudy [Scientific Translation, Jerusalem]*, Vol. 277, p. 33–35, 1972.
- [20] Wagner, C. F., McCann, G. D. and McLane, G. L., Shielding of Transmission Lines, *AIEE Transactions*, Vol. 60, p. 313–328, 612–614, 1941.
- [21] Horvath, T., *Computation of Lightning Protection*, Taunton, Somerset, England: Research Studies, Press, p. 22, 23, 76, 77, 92, 93, 144–147, 1991.
- [22] Wagner, C. F., *Lightning Phenomena*, *Electrical Transmission and Distribution Reference Book*, 4th ed. East Pittsburgh, PA: Westinghouse Electric Corp., p. 542–577, 1964.
- [23] Wagner, C. F., McCann, G. D. and Beck, E., Field Investigations of Lightning, *AIEE Transactions*, Vol. 60, p. 1222–1230, December 1941.
- [24] Wagner, C. F., McCann, G. D. and Lear, C. M., Shielding of Substations, *AIEE Transactions*, Vol. 61, p. 96–100, 313, 448, February 1942.
- [25] Lee, R. H., Protect Your Plant Against Lightning, *Instruments and Control Systems*, Vol. 55, p. 31–34, February 1982.
- [26] Lee, R. H., Lightning Protection of Buildings *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. IA-15, p. 236–240, May/June 1979.

- [27] Lee, R. H., Protection zone for buildings against lightning strokes using transmission line protection practice, *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 1A-14, p. 465–470, November 1978.
- [28] Darveniza, M., Popolansky, F. and Whitehead, E. R. Lightning Protection of UHV Transmission Lines, *Electra*, p. 39–69, July 1975.
- [29] Anderson, J. G., Chapter 12 of *Transmission Line Reference Book 345 kV and Above*, 2nd Ed. Rev. Palo Alto, CA: Electric Power Research Institute, 1987.
- [30] IEEE Working Group, Estimating Lightning Performance of Transmission Lines II—Updates to Analytic Models, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 8, p. 1254–1267, July 1993.
- [31] Whitehead, E. R., CIGRE Survey of the Lightning Performance of Extra-High-Voltage Transmission Lines, *Electra*, Vol. 33, p. 63–89, March 1974.
- [32] IEEE Working Group, Estimating Lightning Performance of Transmission Lines II—Updates to Analytic Models, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 8, p. 1254–1267, July 1993.
- [33] Stringfellow, M. F., Lightning Incidence in the United Kingdom. *Instn. Elect. Engrs. Conf. Pub. No. 108, Lightning and the Distribution System*, p. 30–40, 1974.
- [34] Mousa, A. M., and Srivastava, K. D., The Implications of the Electrogeometric Model Regarding Effect of Height of Structure on the Median Amplitudes of Collected Lightning Strokes, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 4, p. 1450–1460, April 1989.
- [35] Mousa, A. M., The Applicability of Lightning Elimination Devices to Substations and Power Lines, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 13, p. 1120–1127, October 1998.
- [36] Mousa, A. M., and Srivastava, K. D., A Revised Electrogeometric Model for the Termination of Lightning Strokes on Ground Objects, *Proceedings of International Aerospace and Ground Conference on Lightning and Static Electricity*, Oklahoma City, USA, p. 342–352, April 1988.
- [37] Eriksson, A. J., An Improved Electrogeometric Model for Transmission Line Shielding Analysis, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 2, p. 871–886, July 1987.

- [38] Eriksson, A. J., Lightning Striking Distances—An Analytical Study, Proceedings of the 6th International Conference on Gas Discharges and their Applications, Edinburgh, U.K., p. 143–146, 1980.
- [39] Stojković, Z., Grujić, A., Softverski alat za projektovanje gromobranske zaštite visokonaponskih postrojenja, 30. Savetovanje CIGRE Srbija, Ref. C4-03, Zlatibor, 29. maj – 03., Jun 2011.
- [40] Eriksson, A. J., Lightning and Tall Structures, Transaction South African IEE, Vol. 69, p. 238–252, August 1978.
- [41] D’Alessandro, F., The Use of Field Intensification Factors in Calculations for Lightning Protection of Structures, Journal of Electrostatics, Vol. 58, p. 17–43, May 2003.
- [42] D’Alessandro, F., and Gumley, J. R., A Collection Volume Method for the Placement of Air Terminals for the Protection of Structures Against Lightning, Journal of Electrostatics, Vol. 50, p. 279–302, March 2001.
- [43] Yazhong Xu and Mingli Chen, A 3-D Self-Organized Leader Propagation Model and Its Engineering Approximation for Lightning Protection Analysis, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 28, p. 2342–2355, October 2013
- [44] Rizk, F. A. M., Modeling of Substation Shielding Against Direct Lightning Strikes, IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, Vol. 52, p. 664–675, August 2010.
- [45] Becerra, M., and Cooray, V., A Self-Consistent Upward Leader Propagation Model, Journal of Physics D: Applied Physics, Vol. 39, p. 3708–3715, August 2006.
- [46] Becerra, M., and Cooray, V., A Simplified Physical Model to Determine the Lightning Upward Connecting Leader Inception, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 21, p. 897–908, April 2006.
- [47] Becerra, M., Cooray, V. and Roman, F., Lightning Striking Distance of Complex Structures, IET Generation, Transmission & Distribution, Vol. 2, p. 131–138, January 2008.
- [48] Vahidi B., Damaki Aliabada A. A., Software Based on MATLAB for Teaching Substation Lightning Protection Design to Undergraduate Students With

- Emphasize on Different Striking Distance Models, Computer Application in Engineering Education, Vol. 19, p. 256-267, June 2011.
- [49] Stojković Z., Savić M.S., The High-Voltage Substation Configuration Influence on the Estimated Lightning Performance, Electrical engineering, Archiv fur elektrotechnik, Vol. 80, p. 275-283, August 1997.
- [50] Stojković Z., An Improved Method for HV Substation Lightning Performance Estimation, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 14, p. 917-922, July 1999.
- [51] Haddad, A. and Warne, D.F., Advances in High Voltage Engineering, IEE Power and Energy Series 40, IEE Publishing London, p. 107 – 117, 2004.
- [52] Stojković, Z., Projektovanje pomoću računara u elektroenergetici – primena softverskih alata, Monografija, Elektrotehnički fakultet, Beograd, Akademska misao, Beograd, str. 529, Jul 2009.
- [53] Grujić, A., Stojković, Z., Software Tool for Estimating the 3D Lightning Protection Zone of High Voltage Substations; International Journal of Electrical Engineering Education (IJEEE) – Special Issue: Technology transfer – new perspectives on delivering electrical and electronics engineering education, Vol. 48, No. 3, p. 307-322, July 2011.
- [54] Stojković, Z., Grujić, A., Tenbohlen, S., Projektovanje gromobranske zaštite visokonaponskih postrojenja i nadzemnih vodova, 28. Savetovanje JUKO-CIGRE, Ref. C4-01, Vrnjačka Banja, 30. septembar – 05. oktobar 2007.
- [55] Stojković, Z., Computer-Aided Design in Power Engineering – Application of software tools, Springer Berlin Heidelberg, Akademska Misao, Beograd, p.431, 2012.
- [56] User's Guide AutoCAD 2011, Autodesk, 2010.
- [57] McKeown, P.G., Piercy, C.A., Learning to Program with Visual Basic, Second edition, John Wiley & Sons Inc., New York, 2002.
- [58] IEC EN 62305-1, Protection against lightning, Part 1: General principles, 2010.
- [59] IEC EN 62305-3, Protection against lightning, Part 3: Physical damage to structures and life hazards, 2010.
- [60] IEC EN 62305-4, Protection against lightning, Part 4: Electrical and electronic systems within structures, 2010.

- [61] Stojković, S., Tehnika visokog napona-koordinacija izolacije, Univerzitet u Kragujevcu, Tehnički fakultet u Čačku, Čačak, 2011.
- [62] Bouquegneau, C., A Critical View on the Lightning Protection International Standard, Journal of Electrostatics, Vol. 65, p. 395-399, May 2007.
- [63] Shindo, T. and Suda T., A Study of Lightning Risk, IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering, Vol.3, No.5, p. 583-589, September 2008.
- [64] JUS IEC 1024-1-1/1996 Gromobranske instalacije – Određivanje nivoa zaštite, Savezni zavod za standardizaciju, Beograd, 1996.
- [65] Grujić, A., Stojković, Z., Primena fuzzy logike u proceni rizika kvara visokonaponskog postrojenja od atmosferskog pražnjenja, 31. Savetovanje CIGRE Srbija, Ref. C4-03, Zlatibor, 26. maj – 30. maj 2013.
- [66] Song, Y. H., Johns, A. T., Applications of Fuzzy Logic in Power Systems part III: example applications, Power Engineering Journal 13, p. 97 – 103, April 1999.
- [67] Varma, K. A., Mohanta, D. K., Reddy, M. J. B., Applications of Type-2 Fuzzy Logic in Power, 12th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC) – Wroclaw, Poland, May 2013.
- [68] Gallego, L. E., Duarte, O., Torres, H., Vargas, M., Montana, M. J., Perez, E., Herrera, J., Younes, C., Lightning Risk Assessment Using Fuzzy Logic, Journal of Electrostatics Vol.60, p. 233–239, March 2004.
- [69] Fuzzy Logic Toolbox™ User's Guide, COPYRIGHT 1995–2015 by The MathWorks, Inc. September 2015 Online only Revised for Version 2.2.22, 2015.
- [70] Zimmermann, H. J., Fuzzy sets, Decision Making and Expert Systems, Kluwer Academic Publishers, Boston, 1987.
- [71] Grujić, A., Stojković, Z., Fuzzy Logic Based Concept for High Voltage Substation Risk Management against Lightning; IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering Vol. 11, No.5, Jun 2016 issue, Online ISSN: 1931-4981, (rad prihvaćen za publikovanje).
- [72] Uman, M. A., The Lightning Discharge, Academic Press, p.191, 2012.
- [73] Grujić, A., Stojković, Z., Procena rizika kvara visokonaponskih postrojenja od atmosferskog pražnjenja, Tehnika 2013, Vol 68, No.1, str. 95-102, ISSN: 0013-5836.

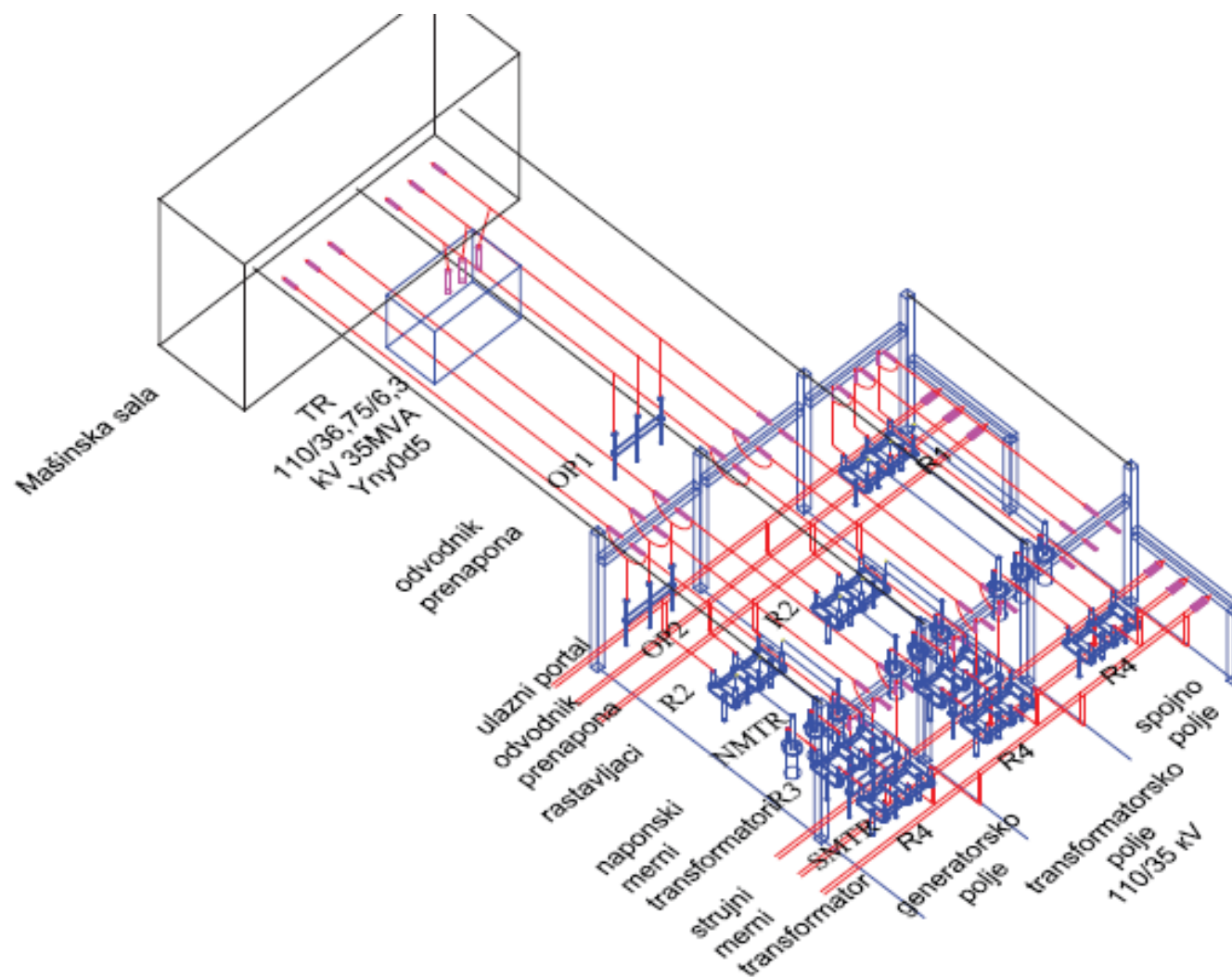
- [74] Schumann, C., Saba, M. M. F., Silva, R. B. G., Schulz, W., Electric Fields Changes Produced by Positives Cloud-to-Ground Lightning Flashes, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, Vol 92, str. 37-42, 1993.
- [75] Grujić, A., Stojković, Z., Upravljanje rizikom kvara od atmosferskog pražnjenja u vetropark, 32. Savetovanje CIGRE Srbija, Ref. C4-04, Zlatibor, 17. maj – 21. maj 2015.
- [76] Lightning Striking Characteristics to Very High Structures, CIGRE Working Group C4.410, ISBN: 978-2-85873-336-1, October 2015.
- [77] Wind Turbine Generator Systems—part 24: Lightning Protection, IEC TR 61400- 24, 2002.
- [78] Ideno, M., Seki, K., Study on Improvement of Performance of Wind Power Generation System and Lightning Damage, in: Proc. of the 28th International Conference on Lightning Protection, Kanazawa, p. 1585–1589, September 2006.
- [79] Yokoyama, S., Lightning Protection of Wind Turbine Blades, *Electric Power Systems Research* 94, p. 3– 9, 2013.
- [80] [http://www.energy.siemens.com/hq/pool/hq/power-generation/renewables/wind-power/Lightning%20protection\\_system\\_brochre.pdf](http://www.energy.siemens.com/hq/pool/hq/power-generation/renewables/wind-power/Lightning%20protection_system_brochre.pdf)
- [81] Asuda, O., Funabashi, T., Transient Analysis on Wind Farm Suffered from Lightning, Proc. 39th International Universities Power Engineering Conference (UPEC 2004); 2004.
- [82] Rodrigues, R.B., Mendes, V.M.F., Catalão, J.P.S., Protection of Wind Energy Systems Against the Indirect Effects of Lightning, *Renewable Energy*, Vol. 36, p. 2888-2896, November 2011.
- [83] Rodrigues, R.B., Mendes, V.M.F., Catalão, J.P.S., Protection of Interconnected Wind Turbines Against Lightning Effects: Overvoltages and Electromagnetic Transients Study, *Renewable Energy*, Vol 46: p. 232-240, October 2012.
- [84] Jiang, J.L., Chang, H.C., Kuo, C.C., Huang, C.K., Transient Overvoltage Phenomena on the Control System of Wind Turbines due to Lightning Strike, *Renewable Energy* Vol. 57, p. 181-189, September 2013.
- [85] Yokoyama, S., Yasuda, Y., Minowa, M., Sato, T., Investigation on Causes of Lightning Damages in Wind Turbine Blades, in: The Seventh International Workshop on High Voltage Engineering (IWHV2010), Kitakyushu, Japan, 2010.

- [86] Paolone, M., Napolitano, F., Borghetti, A., Nucci, C.A., Marzinotto, M., Fiamingo, F., Mazzetti, C., Dellago, H., Models of Wind-Turbine Main Shaft Bearings for the Development of Specific Lightning Protection Systems, in: Proceedings of the IEEE Power Tech 2007 Conference, Lausanne, Switzerland, July 2007.
- [87] Greco, A., Sheng, S., Keller, J., Erdemir, A., Material Wear and Fatigue in Wind Turbine Systems, *Wear of Materials*, Vol. 302, p. 1583 – 1591, April – May 2013.
- [88] Yamamoto, K., Noda, T., Yokoyama, S., Ametanic, A., Experimental and Analytical Studies of Lightning Overvoltages in Wind Turbine Generator Systems, *Electric Power Systems Research* Vol. 79, p. 436–442, March 2009.
- [89] Glushakow, B., Effective Lightning Protection for Wind Turbine Generators, *IEEE Transactions Energy Conversion* Vol. 22, p. 214–222, March 2007.
- [90] Wind turbines – Part 24: Lightning protection, IEC 61400-24, International standard, Ed. 1.0, International Electrotechnical Commission, Geneva, Switzerland, June 2010.
- [91] IEC-61400-24, Wind turbines- Lightning protection, Edition 1.0 2010-06
- [92] [www.hidmet.gov.rs](http://www.hidmet.gov.rs)
- [93] Nievergelt, J., Ventura, A., Hinterberger, H., Interactive Computer Program for Education, reading, MA: Addison-Wesley, 1986.
- [94] Anđelković, G., Grmljavinske nepogode kao ekstremna klimatska pojava u Srbiji, *Glasnik srpskog geografskog društva*, LXXXIX – Vol. 4, 2009.
- [95] CIGRE Working Group 01 (Lightning) of Study Committee 33 (Overvoltage and Insulation Coordination): Brochure No. 63: Guide to procedures for estimating the lightning performance of transmission lines, CIGRE, Paris, 1991.
- [96] VESTAS General Specification V90-1.8MW – [http:// www.vestas.com](http://www.vestas.com)
- [97] Đurišić, Ž., Mikulović, J., A Model for Vertical Wind Speed Data Extrapolation for Improving Wind Resource Assessment using WAsP, *Renewable Energy* Vol. 41, p. 407-411, May 2012.



## **10.PRILOZI**

### **10.1 Primer postrojenja**



Slika 10.1: Primer postrojenja

## 10.2 HE "Đerdap 1"



Slika 10.2: Fotografija prihvatnog sistema mašinske zgrade HE "Đerdap 1"



Slika 10.3: Fotografija zaštitnih užadi koji povezuju mašinsku zgradu i dalekovode na prevođnici



Slika 10.4: Fotografija blok transformatora T1



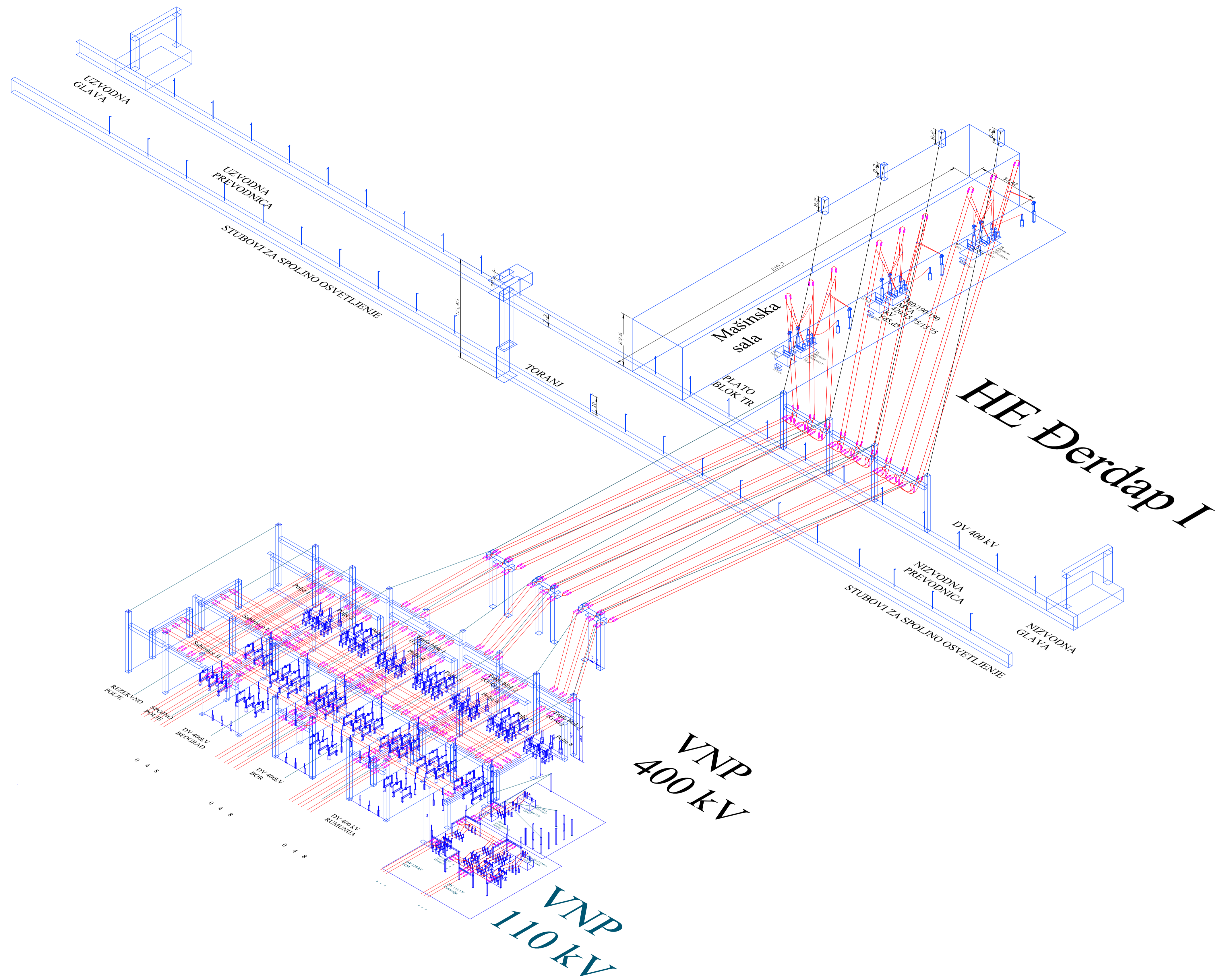
Slika 10.5: Fotografija zaštitnih užadi na mašinskoj zgradi



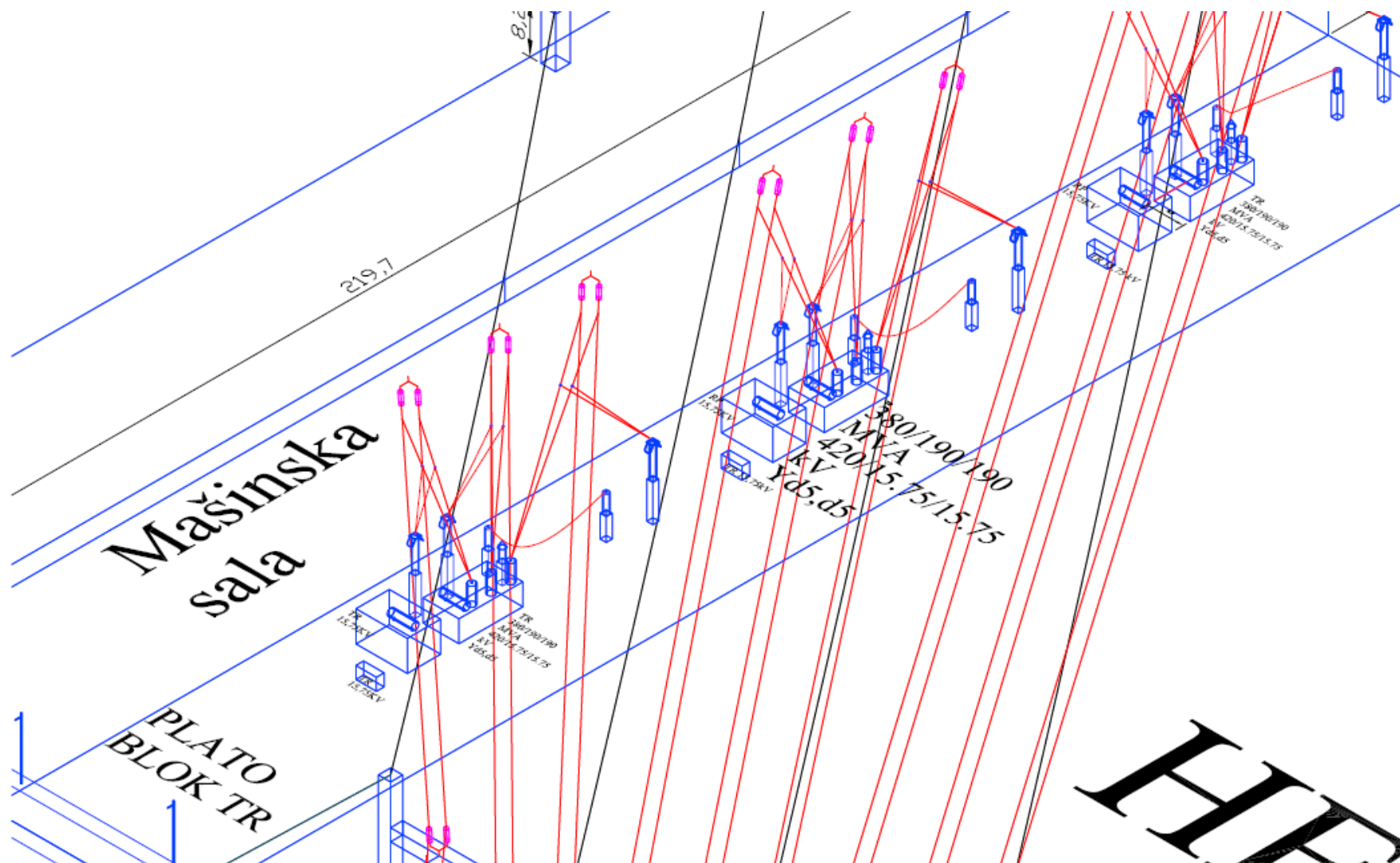
Slika 10.6: Fotografija blok transformatora T2 i T3 HE "Đerdap 1"



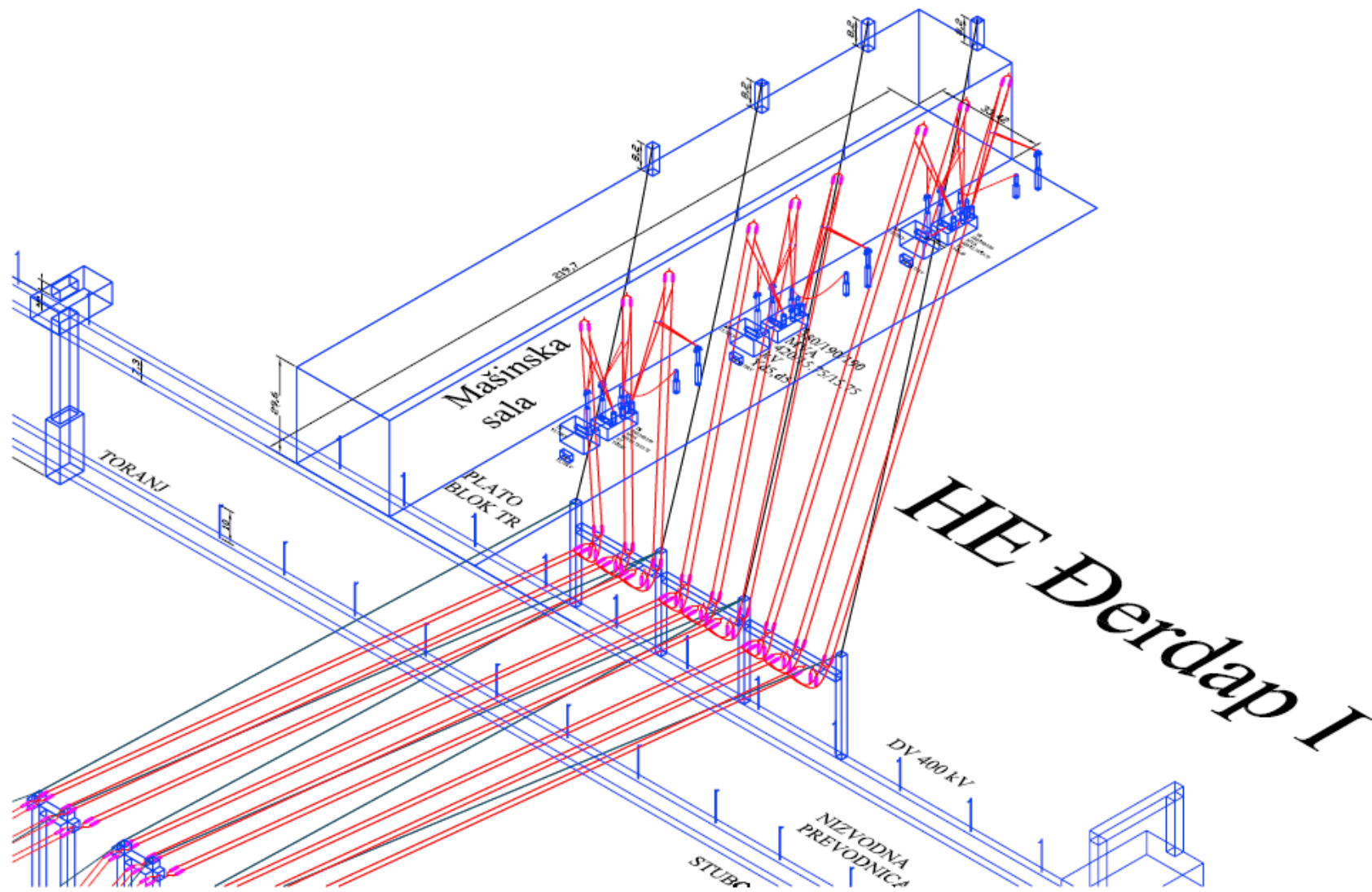
Slika 10.7: Fotografija prekidača u spojnom polju 400 kV postrojenja HE "Đerdap 1"



Slika 10.8: Žičani model HE "Đerdap 1" sa pripadajućim postrojenjima 400 kV i 110 kV



Slika 10.9: Žičani model blok transformatora HE "Đerdap 1"

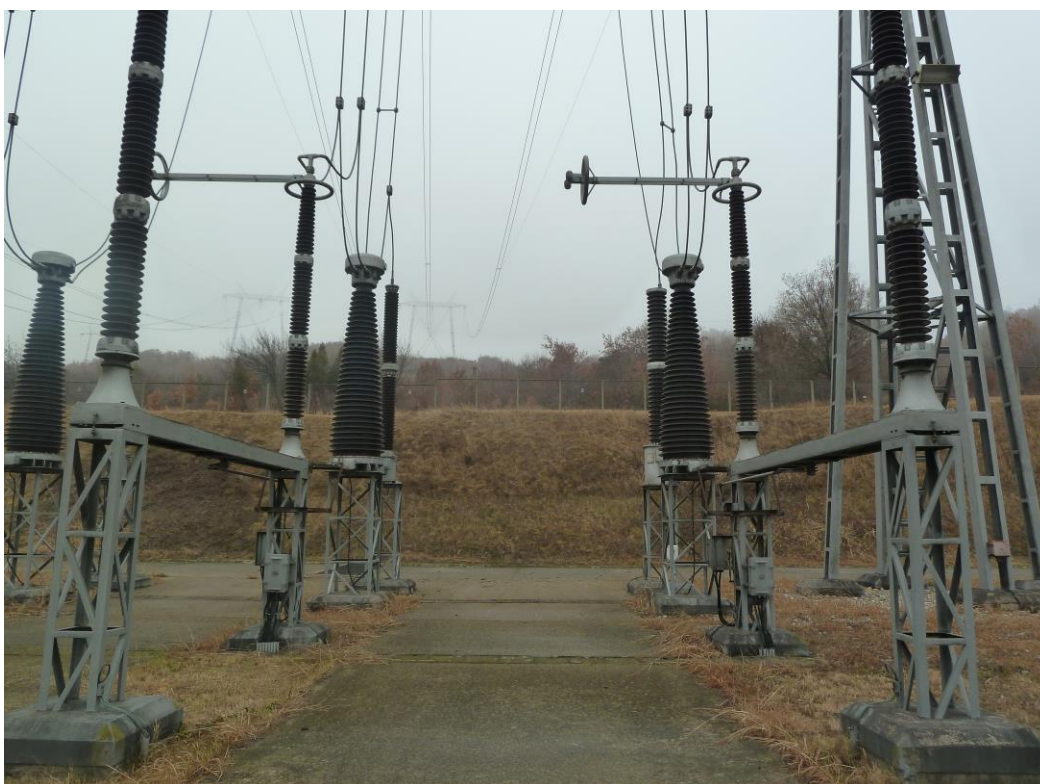


Slika 10.10: Deo prihvatnog sistema gromobranske instalacije mašinske zgrade HE "Đerdap 1"





Slika 10.11: Fotografija distributivnog polja 400 kV Beograd



Slika 10.12: Fotografija visokonaponskih elemenata postrojenja 400 kV "Đerdap 1":  
rastavljači, strujni i naponski merni transformatori

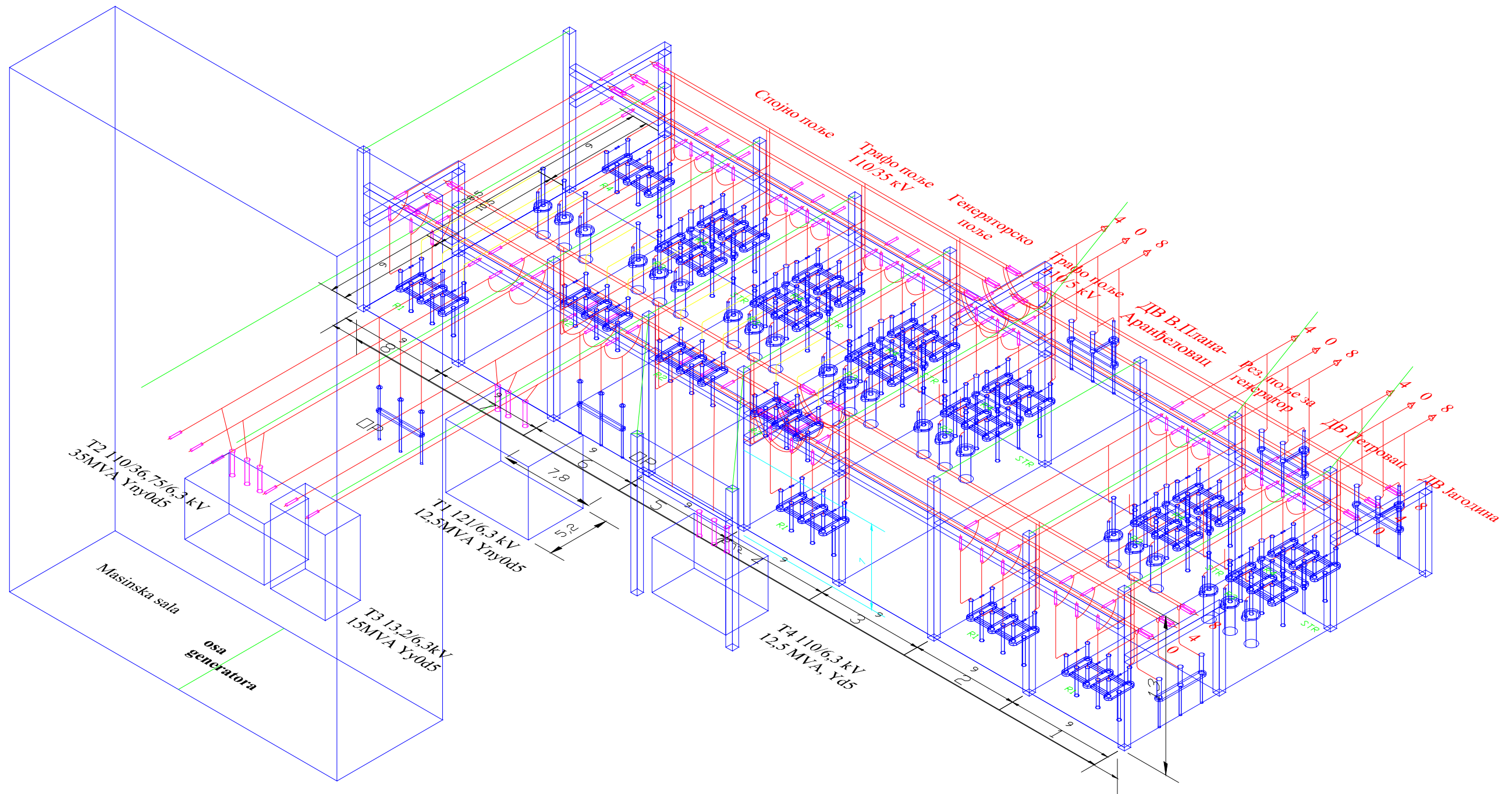


Slika 10.13: Fotografija dela postrojenja 400 kV HE "Đerdap 1"



Slika 10.14: Fotografija gromobranskih elemenata (štapnih hvataljki i zaštitne užadi) postrojenja 110 kV HE "Đerdap 1"

### 10.3 TE "Morava"



10.15: 3D prikaz 110 kV postrojenja TE "Morava"



Slika 10.16: Fotografija transformatora  $T_1$  u sklopu postrojenja 110 kV TE "Morava"



Slika 10.17: Fotografija dela postrojenja 110 kV TE "Morava"



Slika 10.18: Fotografija visokonaponskih elemenata postrojenja 110 kV TE "Morava"



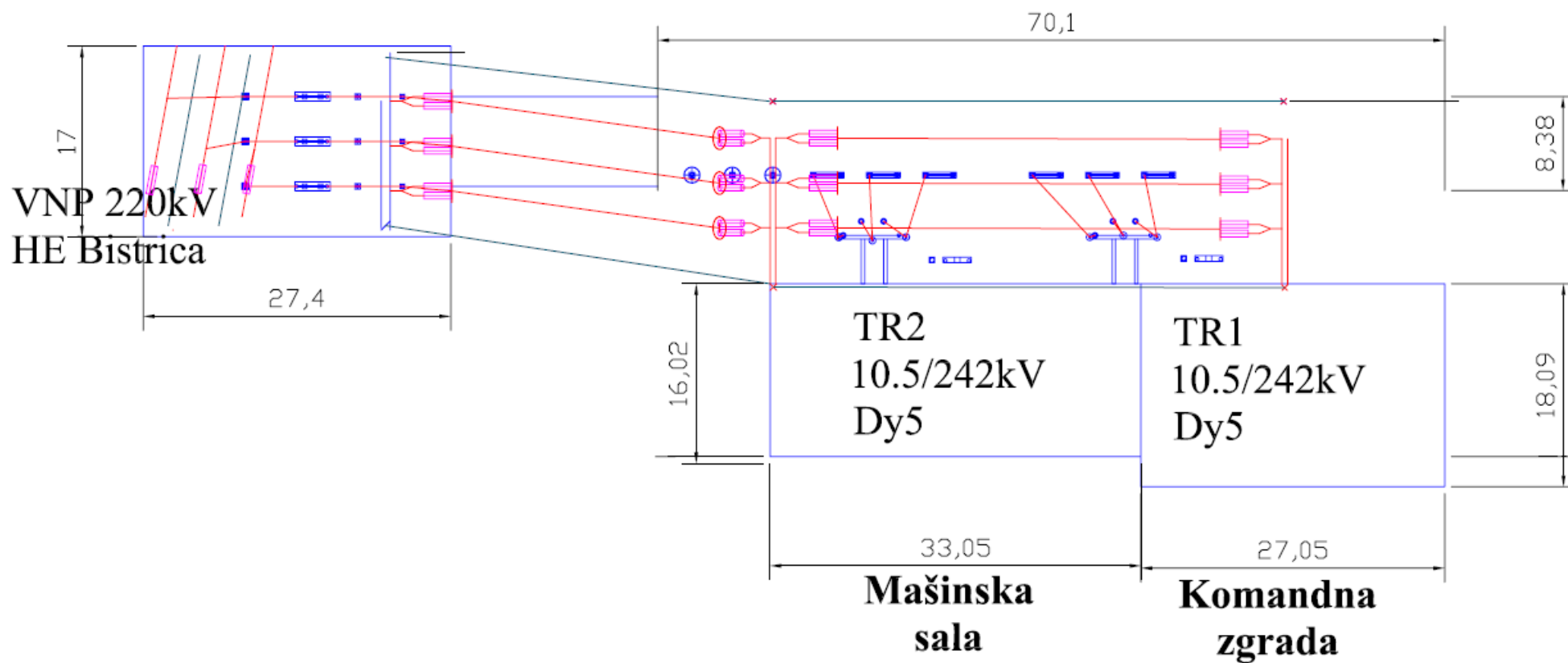
Slika 10.19: Fotografija strujnih i naponskih mernih transformatora na izlazu iz postrojenja 110 kV TE "Morava"



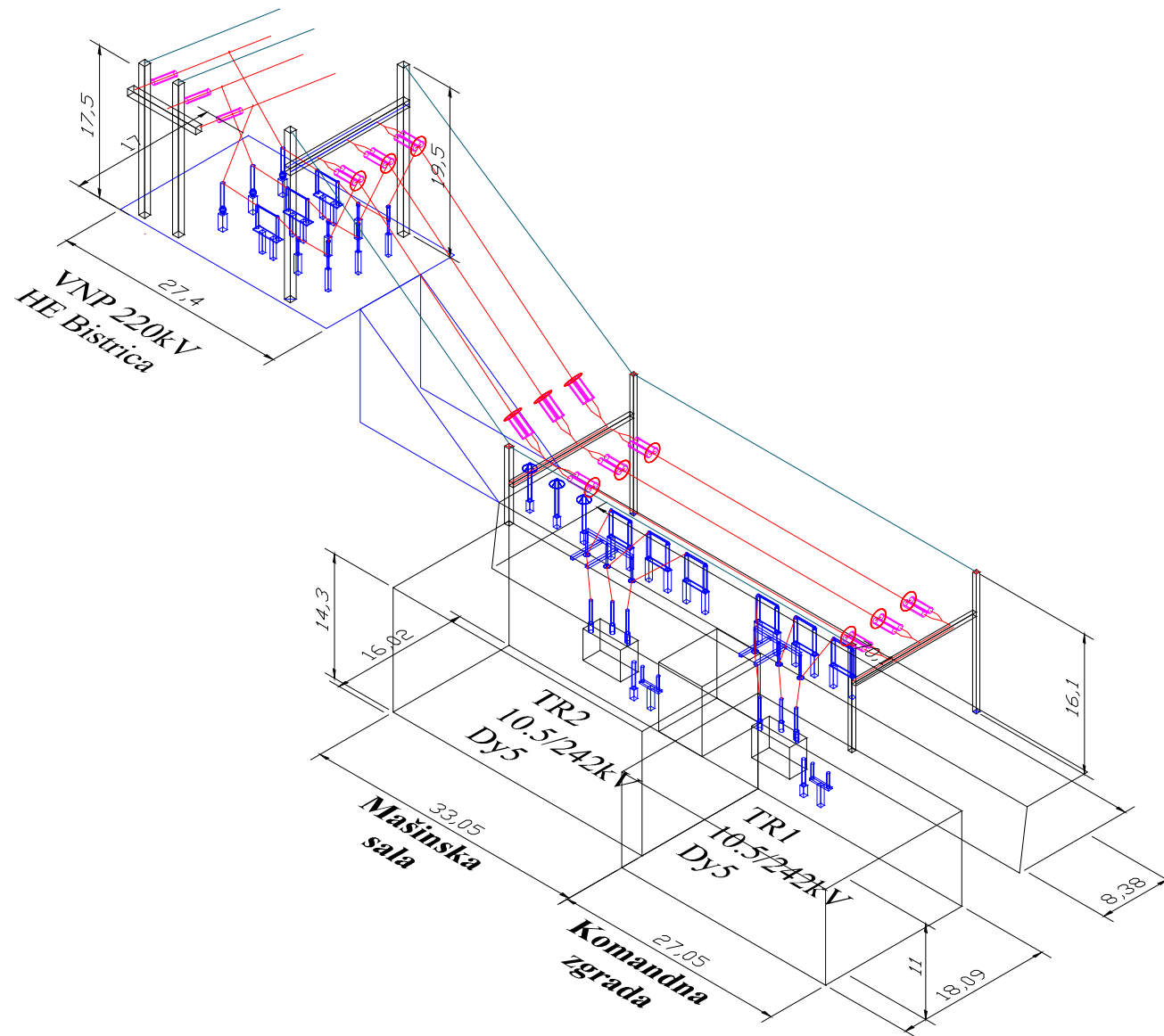
Slika 10.20: Fotografija dalekovoda na izlazu iz postrojenja 110 kV TE "Morava"

## 10.4 HE "Bistrica





Slika 10.21: 2D prikaz dispozicije 220 kV postrojenja HE "Bistrica"



10.22: 3D prikaz 220 kV postrojenja HE "Bistrica"



Slika 10.23: Fotografija prihvratnog sistema gromobranske instalacije dela postrojenja 220 kV HE "Bistrica"



Slika 10.24: Fotografija visokonaponskih elemenata postrojenja 220 kV HE "Bistrica"



Slika 10.25: Fotografija mašinske zgrade i blok transformatora HE "Bistrica"

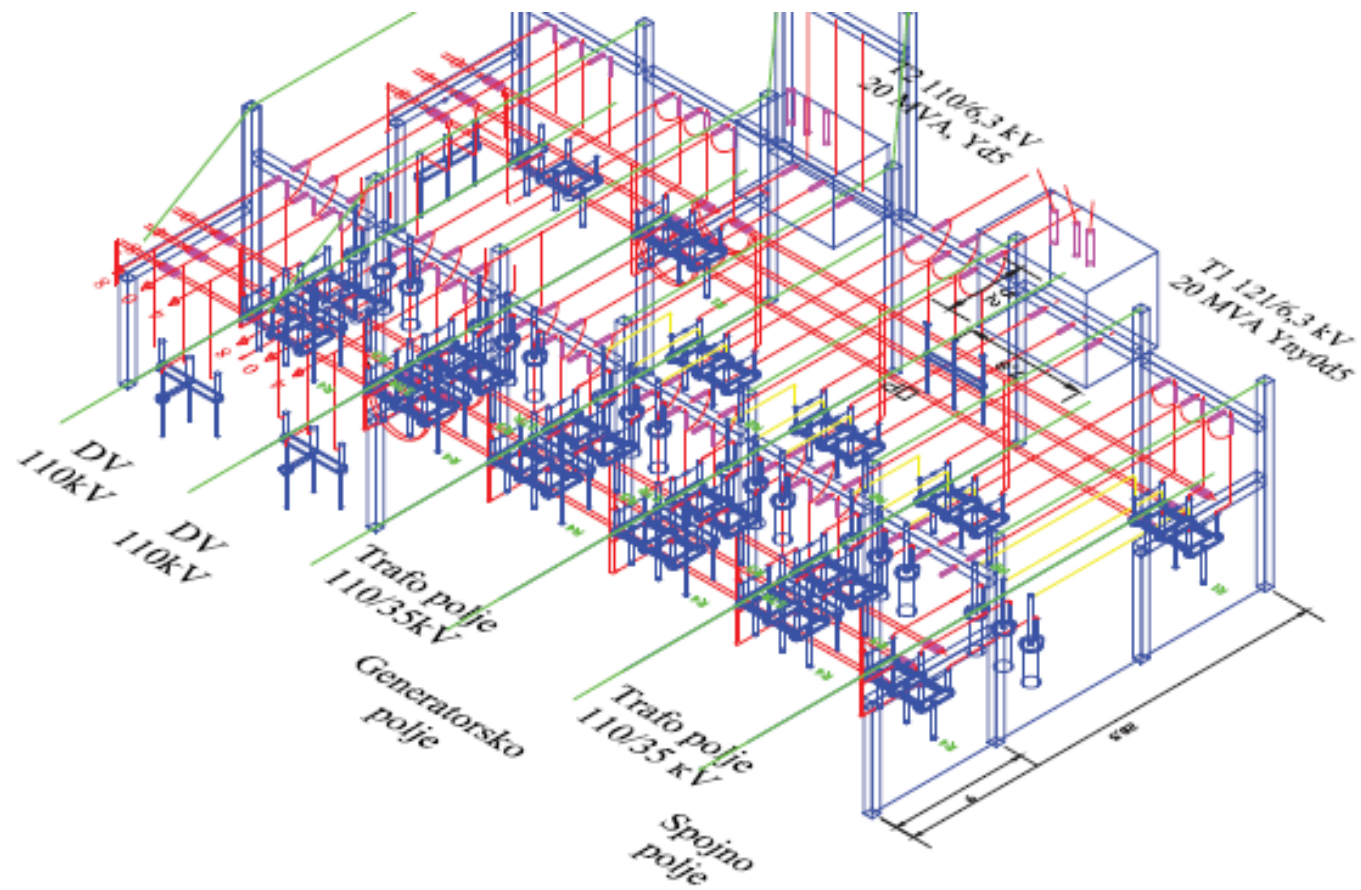


Slika 10.26: Fotografija prihvatnog sistema u vidu dva zaštitna užeta iznad postrojenja 220 kV HE "Bistrica"



Slika 10.27: Fotografija dalekovoda 220 kV "Bajina Bašta"

## **10.5 Primer pripadajućeg 110 kV postrojenja pri vetroelektrani**



Slika 10.28: Žičani model pripadajućeg postrojenja 110 kV pri vetroelektrani

## 10.6 Biografski podaci o autoru disertacije

Aleksandra Grujić je rođena 7.3.1975. godine u Zaječaru. Osnovnu školu, srednju školu i Elektrotehnički fakultet završila je u Beogradu. Diplomirala je 14. 7.2000. godine na smeru Elektroenergetski sistemi.

Postdiplomske studije na Elektrotehničkom fakultetu u Beogradu na smeru Elektroenergetska postrojenja i oprema upisala je 2000. godine. Magistarski rad na temu "Analiza metoda proračuna zone zaštite gromobranske instalacije objekata opšte i posebne namene" odbranila je 23.6.2006. godine na Elektrotehničkom fakultetu u Beogradu. Mentor pri izradi magistarskog rada bio je prof. dr Zlatan Stojković.

Zaposlila se 2000. godine u Višoj elektrotehničkoj školi u Beogradu kao stručni saradnik na predmetima: Aplikativni softver, Električne mašine 1 i 2, Elektromotorni pogoni, Elektrane i razvodna postrojenja, Osnovi elektrotehnike 1 i 2 i Uvod u operativne sisteme. Učestvovala je kao predavač u informatičkoj obuci nezaposlenih sa tržišta rada. Učestvovala je u izradi zadataka za opštinska i republička takmičenja srednjoškolaca iz Osnova elektrotehnike. Zvanje predavača Više elektrotehničke škole u Beogradu stekla je 2006. godine.

Od 2007. godine angažovana je u zvanju predavača u Visokoj škole elektrotehnike i računarstva strukovnih studija u Beogradu u okviru osnovnih strukovnih studija na sledećim predmetima: Nove energetske tehnologije, Distribucija i tržište električne energije, Tehnika visokog napona i Obnovljivi izvori energije. Od 2012. godine angažovana je kao predavač u okviru specijalističkih strukovnih studija na predmetu Kvalitet električne energije. Mentor je preko 100 završnih radova osnovnih i specijalističkih studija u Visokoj školi elektrotehnike i računarstva u Beogradu.

Autor/koautor je 23 naučna i stručna rada. Prvi autor je dva rada publikovana u naučnim časopisima međunarodnog značaja sa SCI liste. Koautor je pet radova publikovanih u zbornicima međunarodnih i regionalnih naučnih skupova, tri rada publikovana u časopisima nacionalnog značaja i trinaest radova publikovanih u zbornicima skupova nacionalnog značaja.

U periodu od 2003 do 2005. godine obavljala je funkciju sekretara smera Energetika. U školskoj 2011/12. godini učestvovala je u reakreditaciji studijskog programa Nove energetske tehnologije i akreditaciji studijskog programa specijalističkih studija Nove energetske tehnologije u Visokoj školi elektrotehnike i računarstva strukovnih studija u Beogradu. Od 2012. godine obavlja funkciju rukovodioca studijskog programa Nove energetske tehnologije. Formirala je laboratoriju za Obnovljive izvore energije u Visokoj školi elektrotehnike i računarstva strukovnih studija u Beogradu.



## 10.7 Izjava o autorstvu

Potpisana: **Aleksandra Đ. Grujić**

Izjavljujem da je doktorska disertacija pod naslovom:

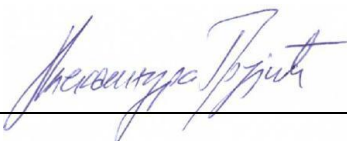
**Modelovanje zone zaštite visokonaponskog postrojenja od direktnog  
atmosferskog pražnjenja**

- rezultat sopstvenog istraživačkog rada,
- da predložena disertacija u celini ni u delovima nije bila predložena za dobijanje bilo koje diplome prema studijskim programima drugih visokoškolskih ustanova,
- da su rezultati korektno navedeni i
- da nisam kršio/la autorska prava i koristio intelektualnu svojinu drugih lica.

U Beogradu

7.3.2016.

Potpis doktoranda



---

## 10.8 Izjava o istovetnosti štampane i elektronske verzije doktorskog rada

Ime i prezime autora: Aleksandra Đ. Grujić

Studijski program: Elektrotehnika i računarstvo

Naslov rada: **Modelovanje zone zaštite visokonaponskog postrojenja od direktnog atmosferskog pražnjenja**

Mentor: Dr Zlatan Stojković, redovni profesor, Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički fakultet

Potpisana: **Aleksandra Đ. Grujić**

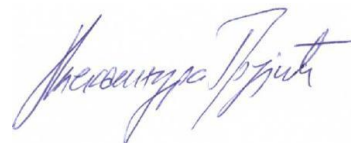
Izjavljujem da je štampana verzija mog doktorskog rada istovetna elektronskoj verziji koju sam predala za objavljivanje na portalu Digitalnog repozitorijuma Univerziteta u Beogradu.

Dozvoljavam da se objave moji lični podaci vezani za dobijanje akademskog zvanja doktora nauka, kao što su ime i prezime, godina i mesto rođenja i datum odbrane rada. Ovi lični podaci mogu se objaviti na mrežnim stranicama digitalne biblioteke, u elektronskom katalogu i u publikacijama Univerziteta u Beogradu.

U Beogradu

7.3.2016.

Potpis doktoranda



---

## 10.9 Izjava o korišćenju

Ovlašćujem Univerzitetsku biblioteku „Svetozar Marković“ da u Digitalni repozitorijum Univerziteta u Beogradu unese moju doktorsku disertaciju pod naslovom:

### **Modelovanje zone zaštite visokonaponskog postrojenja od direktnog atmosferskog pražnjenja**

koja je moje autorsko delo.

Disertaciju sa svim prilogima predao/la sam u elektronskom formatu pogodnom za trajno arhiviranje.

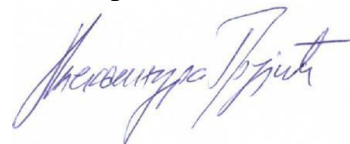
Moju doktorsku disertaciju pohranjenu u Digitalni repozitorijum Univerziteta u Beogradu mogu da koriste svi koji poštuju odredbe sadržane u odabranom tipu licence Kreativne zajednice (Creative Commons) za koju sam se odlučio/la.

1. Autorstvo
2. Autorstvo – nekomercijalno
3. Autorstvo – nekomercijalno – bez prerade
4. Autorstvo – nekomercijalno – deliti pod istim uslovima
5. Autorstvo – bez prerade
6. Autorstvo – deliti pod istim uslovima

U Beogradu

7.3.2016.

Potpis doktoranda



---

1. Autorstvo – Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje dela, i prerade, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence, čak i u komercijalne svrhe. Ovo je najslobodnija od svih licenci.

2. Autorstvo – nekomercijalno. Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje dela, i prerade, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence. Ova licenca ne dozvoljava komercijalnu upotrebu dela.

3. Autorstvo – nekomercijalno – bez prerade. Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje dela, bez promena, preoblikovanja ili upotrebe dela u svom delu, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence. Ova licenca ne dozvoljava komercijalnu upotrebu dela. U odnosu na sve ostale licence, ovom licencom se ograničava najveći obim prava korišćenja dela.

4. Autorstvo – nekomercijalno – deliti pod istim uslovima. Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje dela, i prerade, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence i ako se prerada distribuira pod istom ili sličnom licencom. Ova licenca ne dozvoljava komercijalnu upotrebu dela i prerada.

5. Autorstvo – bez prerade. Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje dela, bez promena, preoblikovanja ili upotrebe dela u svom delu, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence. Ova licenca dozvoljava komercijalnu upotrebu dela.

6. Autorstvo – deliti pod istim uslovima. Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje dela, i prerade, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence i ako se prerada distribuira pod istom ili sličnom licencom. Ova licenca dozvoljava komercijalnu upotrebu dela i prerada. Slična je softverskim licencama, odnosno licencama otvorenog koda.