

DOI: [10.46793/CIGRE37.C4.02](https://doi.org/10.46793/CIGRE37.C4.02)**C4.02****REALIZACIJA PRENAPONSKE ZAŠTITE ZA ELEKTROENERGETSKO NAPAЈANJE
TUNELA NA AUTO-PUTU „MILOŠ VELIKI”****IMPLEMENTATION OF OVERVOLTAGE PROTECTION FOR ELECTRICAL POWER
SUPPLY OF THE TUNNEL ON THE "MILOŠ VELIKI" HIGHWAY****Nada Tošić, Tomislav Rajić, Milan Savić, Mileta Žarković***

Kratak sadržaj: Ovaj rad bliže objašnjava realizaciju prenaponske zaštite za elektroenergetsko napajanje tunela na auto-putu „Miloš Veliki”. Analizirane su posledice atmosferskog pražnjenja u transformatorsku stanicu 10/0,4 kV koja je van tunela, na otvorenom, odnosno mogući prenaponi koji tada nastaju na instalaciji transformatorske stanice. Analiziran je uticaj kompleksnosti šeme na rezultat simulacije, a što je značajno za izbor uređaja za zaštitu od prenapona. Komentarisana su dva načina modelovanja i komentarisano je koji je prikladniji i tačniji. Izvršena je analiza osetljivosti kako dužine veza i broj razvodnih ormana utiču na visinu prenapona. Menjan je broj kablova i njihova dužina. Zaključak rada treba da ukaže da li je potrebna primena prenaponske zaštite u svim razvodnim ormanima ili ne.

Ključne reči: zaštita tunela, atmosferski prenapon, modelovanje

Abstract: This paper explains in more detail the implementation of overvoltage protection for the power supply of the tunnel on the "Miloš Veliki" highway. The consequences of atmospheric discharge into the 10/0.4 kV transformer station, which is outside the tunnel, in the open air, were analyzed, that is, possible overvoltages that then occur at the installation of the transformer station. The influence of the complexity of the scheme on the result of the simulation was analyzed, which is significant for the selection of devices for protection against overvoltage. Two ways of modeling are commented and it is commented which one is more appropriate and more accurate. A sensitivity analysis was performed on how the lengths of the connections and the number of distribution cabinets affect the height of the overvoltage. The number of cables and their length have been changed. The conclusion of the work should indicate whether the application of overvoltage protection in all distribution cabinets is required or not.

Key words: tunnel protection, lightning overvoltage, modeling

* Nada Tošić, BUCK, nadadtosic@gmail.com

Tomislav Rajić, Univerzitet u Beogradu-Elektrotehnički fakultet, rajic@etf.rs

Milan Savić, Elektrotehnički fakultet, Beograd, savic_ms@eunet.rs

Mileta Žarković, Univerzitet u Beogradu -Elektrotehnički fakultet, mileta@etf.rs

1 UVOD

Elektroenergetski sistem, kao najveći tehnički sistem na planeti, predstavlja okosnicu naše civilizacije i može se posmatrati sa više tački gledišta, koje su od interesa za praksu. Jedno od praktičnih značajnih razmatranja je gromobranska zaštita ljudi, kao i naprava, sklopova, uređaja i postrojenja elektroenergetskog sistema [1]. U ovom radu će biti simulirana gromobranska zaštita jednog elektroenergetskog postrojenja, koje je u sklopu saobraćajne infrastrukture Republike Srbije. U fokusu rada će biti realizacija prenaponske zaštite za elektroenergetsko napajanje tunela na auto-putu.

Pre izlaganja osnovnog sadržaja, u drugom odeljku ovog rada, biće sažeto izložen pregled osnovnih pojmova i koncepata gromobranske zaštite. Pojemovna određenja i objašnjenja u ovom odeljku imaju za cilj da podsete čitaoca na terminologiju, skraćenice i činjenice koje su od šireg značaja i interesa za temu ovog rada [1-3]. U trećem odeljku se predstavlja gromobranska zaštita u tunelu na auto-putu visokog ranga saobraćajne infrastrukture Republike Srbije. Navode se osnovni pojmovi i koncepti koji su korisni za dalje praćenje rada. Daje se sažeti pregled sa najosnovnijim pojmovnim određenjima.

Četvrti odeljak predstavlja konkretne simulacione modele i rezultate simulacija u vidu grafika pojedinih prenapona. Opisuju se elementi šeme, odnosno modela, postrojenja i njihova implementacija u korišćenom softverskom alatu [4-5]. Simuliraju se različite konfiguracije elemenata, odnosno komponenti, koje predstavljaju osnovni i tačniji model posmatranog postrojenja. Analiziraju se različiti scenariji, kao što je šema bez odvodnika. Posmatra se slučaj odvodnika modelovanog kao nelinearnog otpornika ili naponski-upravljanog prekidača. Ispituje se osetljivost usvojenog modela gromobranske zaštite na variranje parametara određenog elemenata (komponente), kao što je dužina kabla ili njegova karakteristična impedansa.

U pretposlednjem, petom, odeljku se predstavlja zaključak sa diskusijom. Rekapitulira se rad i navode smernice za dalja moguća istraživanja. U poslednjem odeljku se navodi literatura korišćena za rad i reference na korišćeni softver.

2 OSNOVNI KONCEPTI GROMOBRANSKE ZAŠTITE

Oluja sa grmljavinom nastaje kada se tople vazdušne mase, koje sadrže dovoljno vlage, prenose na velike visine. Važan uslov za nastajanje grmljavinskih aktivnosti je postojanje određene količine vodene pare u toploj struji vazduha. Jačina električnog polja pri kome dolazi do jonizacije vazduha u grmljavinskom procesu je tipično 10 kV/cm.

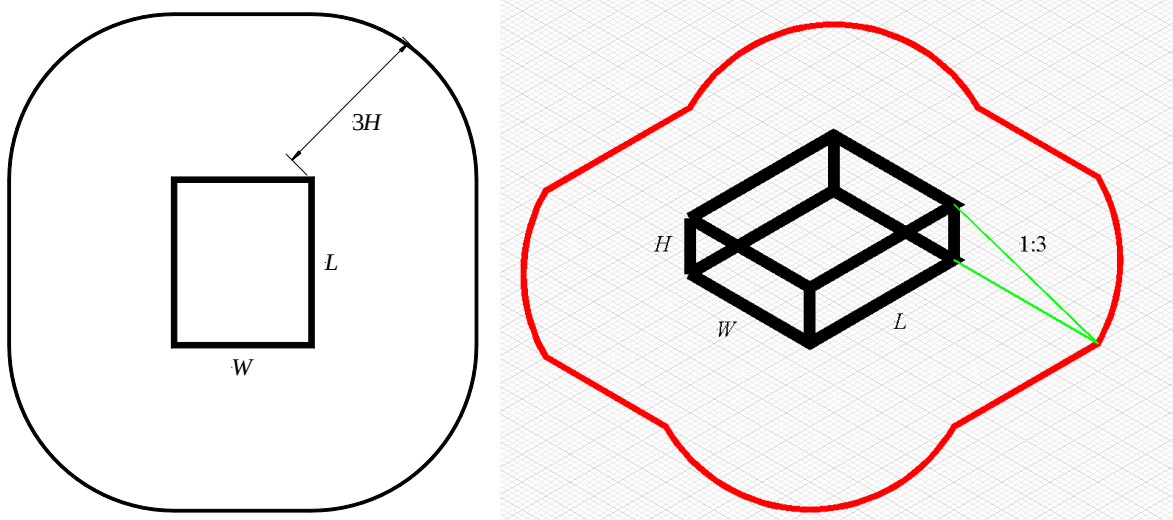
Među osnovnim parametrima atmosferskog pražnjenja je struja atmosferskog pražnjenja, koju odlikuje amplituda, oblik, polaritet i strmina. Srednja strmina čela struje atmosferskog pražnjenja ima tipičnu vrednost 200 kA/μs za nivo zaštite I, 150 kA/μs za nivo zaštite II, i 100 kA/μs za nivo zaštite III ili IV. Tipične temene vrednosti jačine struje su 200 kA, 150 kA i 100 kA, respektivno. Oluja sa grmljavinom može prouzrokovati više atmosferskih pražnjenja, a period glavnog pražnjenja traje, tipično, od 50 μs do 100 μs. Pri kraju glavnog pražnjenja pojavljuje se, takođe, dugotrajna struja koja može iznositi 100 A do 200 A u trajanju od nekoliko desetina ili stotina milisekundi.

Osnovni meteorološki parametri značajni za gromobransku zaštitu su keraunički nivo, dnevna gustina pražnjenja, i godišnja gustina pražnjenja, i oni daju informaciju o grmljavinskoj aktivnosti na nekom području.

Keraunički nivo T_d se definiše kao prosečan broj dana sa grmljavinom u toku jedne godine na određenom području. Dnevna gustina pražnjenja N_D predstavlja broj atmosferskih pražnjenja u toku jednog grmljavinskog dana u horizontalnu površinu zemlje po km^2 . Godišnja gustina pražnjenja N_G je $N_G = T_d N_D$ i data je empirijskim izrazom $N_G = 0.04 T_d^{1.25}$.

Sa gledišta gromobranske zaštite, događaji koji se mogu smatrati opasnim zaštićeni objekat su sledeći: (1) pražnjenja u objekat, (2) pražnjenja u blizini objekta, (3) pražnjenja u vod koji ulazi u objekat, i (4) pražnjenja u neki drugi objekat na koji je povezan vod

Prihvatna površina A_D je oblast zemljišta u kojoj se očekuje udar groma. Kod izdvojenih objekata na ravnom zemljištu, prihvatna površina je površina definisana presekom između površine zemlje i prave linije sa nagibom 1/3, koja polazi od gornjih delova objekta (i tamo ih dodiruje) i okreće se oko nje. Za objekat u obliku kvadra širine W , dužine L i visine H , na ravnom zemljištu, prihvatna površina, je $A_D = W \cdot L + 2(3H \cdot W) + 2(3H \cdot L) + \pi(3H)^2$, Slika 1.



Slika 1: Prihvatna površina objekta u obliku kvadra na ravnom zemljištu.

Ako objekat ima složeni oblik, kao što su uzdignute izbočine na krovu, onda za određivanje prihvatne površine treba koristiti grafičku metodu. Prihvatna površina je veća od prihvatne površine za minimalnu visinu, a manja od odgovarajuće površine za maksimalnu visinu najviše izbočine $W \cdot L + 2(3H \cdot W) + 2(3H \cdot L) + \pi(3H)^2 < A_D < \pi(3H_{\max})^2$.

Atmosferska pražnjenja mogu prouzrokovati napone i struje u elektroenergetskom postrojenju koji su znatno veći od očekivanih radnih vrednosti, kao i vrednosti za koje je postrojenje projektovano. Zbog toga je važno proučiti prenapone u postrojenju, koji nastaju usled udara groma, i realizovati odgovarajuću prenaponsku zaštitu. Prenaponi usled udara groma zavise od uzemljenja elektroenergetskih postrojenja, tako da je za proračun naponske zaštite od interesa što tačnije modelovati otpornost uzemljenja. Ponašanje uzemljivača prilikom odvođenja struje groma je definisano njegovim udarnim karakteristikama. Injektiranje udarne struje u uzemljivač dovodi do pojave vremenski promenljivih napona i struja duž uzemljivača.

Važno svojstvo uzemljivača, sa gledišta gromobranske zaštite, je udarna impedansa definisana kao količnik napona i injektirane struje. U projektantskoj praksi, zbog uprošćavanja, se često koristi udarna otpornost koja je određena kao količnik (1) maksimalne vrednosti napona na mestu injektiranja struje i (2) maksimalne vrednosti struje na mestu injektiranja.

$$R_{ud} = \frac{U_{\max, \text{injektiranja}}}{I_{\max, \text{injektiranja}}} \quad (1)$$

Za inženjersku praksu je značajna veza udarne otpornosti R_{ud} i stacionarne otpornosti R_{stac} uzemljivača koja je definisana kao količnik napona i struje uzemljivača u stacionarnom elektromagnetskom polju.

$$R_{ud} = k_{ud} R_{stac} \quad (2)$$

k_{ud} je udarni koeficijent koji se u praksi uzima da je manji od 2 zbog rezerve na strani sigurnosti. Udarne otpornost je složena funkcija geometrijskog oblika uzemljivača, specifične otpornosti tla, kao i jačine, polariteta i strmine udarnog elektromagnetskog talasa nastalog usled atmosferskog pražnjenja. Na osnovu poznate vrednosti udarnog koeficijenta se može odrediti maksimalna vrednost napona na uzemljivaču $u_{uz} = R_{ud} i_{uz}$. On može imati velike vrednosti u toku atmosferskog pražnjenja i može izazvati preskoke na druge električne instalacije ili metalne delove objekta koji se nalaze u njegovoj blizini.

Neželjen uticaj maksimalne vrednosti napona uzemljivača na nivou referentne zemlje se smanjuje tako što se (1) smanjuje otpornost uzemljenja, (2) međusobno povezuju uzemljivači sa svim metalnim instalacijama i delovima u okolini radi izjednačavanja potencijala. Izjednačavanje potencijala se može vršiti neposredno povezivanjem ugroženih metalnih delova ili preko odvodnika prenapona u slučaju kada stalna veza između gromobranske instalacije i drugih instalacija nije poželjna.

U slučaju trakastog uzemljivača u homogenom tlu, pri udarnom naponu, udarna otpornost će biti veća od stacionarne zbog toga što se strujnice sabijaju bliže površini zemlje, $k_{ud} > 1$. U slučaju trakastog uzemljivača u nehomogenom tlu udarna otpornost zavisi od provodnosti slojeva. Ako je površinski sloj manje specifične otpornosti (na primer, humus) a dublji sloj veće (na primer, kameniti), onda će udarna otpornost biti manja od stacionarne. Ako je površinski sloj lošije provodljiv (na primer, suva zemlja ili pesak) a dublji sloj provodljiviji (na primer, vlažna podloga zbog podzemnih voda), ova otpornost će biti veća od stacionarne.

Sve mere zaštite od atmosferskog pražnjenja čine ukupnu zaštitu od atmosferskog pražnjenja, smanjuju rizik neželjenih događaja, i razmatraju se u seriji standarda IEC 62305. Iz praktičnih razloga, kriterijumi za projektovanje, postavljanje i održavanje objekta, mera zaštite se razmatraju u dve odvojene grupe: (1) smanjenje fizičkog oštećenja i opasnosti po život u objektu, IEC 62305-3, (2) smanjenje otkazivanja električnih i elektronskih sistema u objektu, IEC 62305-4. [6-8]

LPS (Lightning Protection System) sistem zaštite od atmosferskog pražnjenja je kompletan sistem koji se koristi za smanjenje oštećenja usled atmosferskog pražnjenja u objektu. Sastoji se od spoljašnjih i unutrašnjih sistema [9]. Spoljašnji sistem zaštite od atmosferskog pražnjenja (external lightning protection system) se sastoji od prihvatnog sistema, sistema spusnih provodnika i sistema uzemljenja.

Funkcija spoljašnjeg sistema je da (1) prihvati udar atmosferskog pražnjenja u objekat preko prihvatnog sistema, (2) bezbedno provede struju atmosferskog pražnjenja prema zemlji preko sistema spusnih provodnika, (3) razvede struju atmosferskog pražnjenja u zemlju preko sistema za uzemljenje. Unutrašnji sistem zaštite od atmosferskog pražnjenja (internal lightning protection system) se sastoji od sistema za izjednačenje potencijala i/ili električne izolacije spoljašnjeg sistema. Uloga unutrašnjeg sistema je da spreči opasna varničenja unutar objekta izjednačenjem potencijala ili pomoću sigurnosnih razmaka (i prema tome električnog odvajanja) između komponenti sistema zaštite i drugih provodljivih struktura unutar objekta.

Prema osetljivosti objekta na atmosferska pražnjenja bira se nivo gromobranske zaštite. LPL I nivo zaštite se ostvaruje za parametre atmosferskog pražnjenja sa verovatnoćom da će biti premašeni sa 1% za negativne udare i 10% za pozitivne. LPL II nivo zaštite znači da su parametri pražnjenja 75% u odnosu na LPL I. LPL III, LPL IV nivo zaštite znači da su parametri pražnjenja 50% u odnosu na LPL I. Izbor nivoa zaštite, sa jedne strane, zavisi od očekivanog broja udara groma u objekat, dimenzije objekta i intenziteta grmljavinske aktivnosti. Sa druge strane, nivo zaštite se bira i na osnovu namene šticećenog objekta: (1) uobičajeni objekti, kao što su stambeni, poslovni, škole, bolnice i muzeji, (2) objekti ograničene opasnosti, (3) objekti opasni za užu okolinu.

Razmak između spusnih provodnika d_s i stranica okaca mreže d_m , na objektu koji se štiti od udara groma, zavise od potrebnog nivoa zaštite: za LPL I je $d_s = 10\text{ m}$ a $d_m = 5\text{ m}$, za LPL II je $d_s = d_m = 10\text{ m}$, za LPL III je $d_s = d_m = 15\text{ m}$ i za LPL IV je $d_s = d_m = 20\text{ m}$. Standardni razmaci između spusnih provodnika i drugih metalnih delova takođe zavise od nivoa zaštite, ali i od materijala na kome je spusni provodnik i od konfiguracije spusnog provodnika. Na primer, ako je geometrija spusnog provodnika takva da čini savijanje, onda se i to mora uzeti u proračun. Jačina struje kroz spusne provodnike se može redukovati (smanjiti) tako što se postavi više paralelnih spusnih provodnika.

Proces projektovanja i realizacije prenaponske zaštite je veoma složen i mora uzeti u obzir niz uslova, ograničenja i specifikacija, kao što su elektroenergetska, arhitektonsko-gradjevinska, geološka, tehno-ekonomska i finansijska.

3 PRENAPONSKA ZAŠTITA U TUNELU

U ovom radu se razmatra prenaponska zaštita za elektroenergetsko napajanje tunela na autoputu „Miloš Veliki”. Posmatraju se tuneli Laz i Munjino brdo. Analizira se posledica atmosferskog pražnjenja u transformatorsku stanicu 10/0.4 kV koja je van tunela, na otvorenom, odnosno mogući prenaponi koji tada nastaju na instalaciji transformatorske stanice. Pretpostavlja se da je udar groma u prihvatni gromobranski sistem na zgradi transformatorske stanice. Ovakvo direktno atmosfersko pražnjenje u transformatorsku zgradu može da prouzrokuje prenapone i poveća potencijal uzemljivača, a takvi prenaponi se moraju ograničiti. Zahtevana gromobranska zaštita je klase II. Simulacijom na računaru, u odgovarajućem softverskom alatu, se procenjuje napon na uzemljivaču i donosi odluka o upotrebi odvodnika prenapona na strani energetskog transformatora na kojoj je napon 10 kV.

Prenaponi usled atmosferskog pražnjenja, koji nastaju usled povećanja napona na uzemljivaču transformatorske zgrade, utiču na naprezanje izolacije između namotaja energetskog transformatora na strani sa naponom od 0.4 kV prema masi, odnosno između priključaka transformatora na 0.4 kV strani i kućišta transformatora.

Ukoliko je potrebno, na niskonaponskoj strani energetskog transformatora se postavlja odvodnik prenapona i time se rešava problem naprezanja izolacije usled prenapona nastalog udarom groma.

Zbog porasta potencijala uzemljivača, u odnosu na referentnu tačku u beskonačnosti u kojoj je potencijal jednak nuli, od interesa je razmotriti potrebu za postavljanjem uređaja za prenaponsku zaštitu (SPD, Surge Protective Device) između (1) šine za izjednačavanje potencijala, koja je vezana za uzemljivač u razvodnom ormanu, i (2) niskonaponskih napojnih provodnika, koji dobijaju spoljni potencijal koji je približno na potencijalu referentne nule.

Projekat prenaponske zaštite mora da proveri da li je potrebno postavljanje uređaja za prenaponsku zaštitu (1) u pojedinim razvodnim ormanima unutar objekta transformatorske stanice i (2) u razvodu niskog napona van objekta, odnosno u tunelu. Ako se pokaže potreba za postavljanjem uređaja za prenaponsku zaštitu, onda se mora proveriti da li karakteristike odabranih uređaja u potpunosti odgovaraju uslovima koji vladaju na mestu ugradnje. U ovom radu se razmatra samo jedan deo prenaponske zaštite za elektroenergetsko napajanje tunela na auto-putu. Drugim rečima, razmatra se samo jedan deo podsistema elektroenergetske infrastrukture neophodne za tunel na auto-putu.

Energetski transformator u posmatranoj transformatorskoj stanici (TS) je prenosnog odnosa 10/0.4 kV, a snage 630 kVA. Naznačeni napon primara, visokonaponske strane, je 12 kV. Podnosivi napon primara industrijske frekvencije, efektivna vrednost, je 28 kV. Atmosferski udarni napon primara, temena vrednost, oblika 1.2/50 μ s je 75 kV. Podnosivi napon sekundara, niskonaponske strane, industrijske frekvencije, efektivna vrednost, je 3 kV. Atmosferski udarni napon sekundara, temena vrednost, oblika 1.2/50 μ s je 6 kV. Najviši dozvoljeni udarni napon za 0.4 kV je 6 kV i on se uzima u odsustvu specifikacije kao podnosivi udarni napon oblika 1.2/50 μ s.

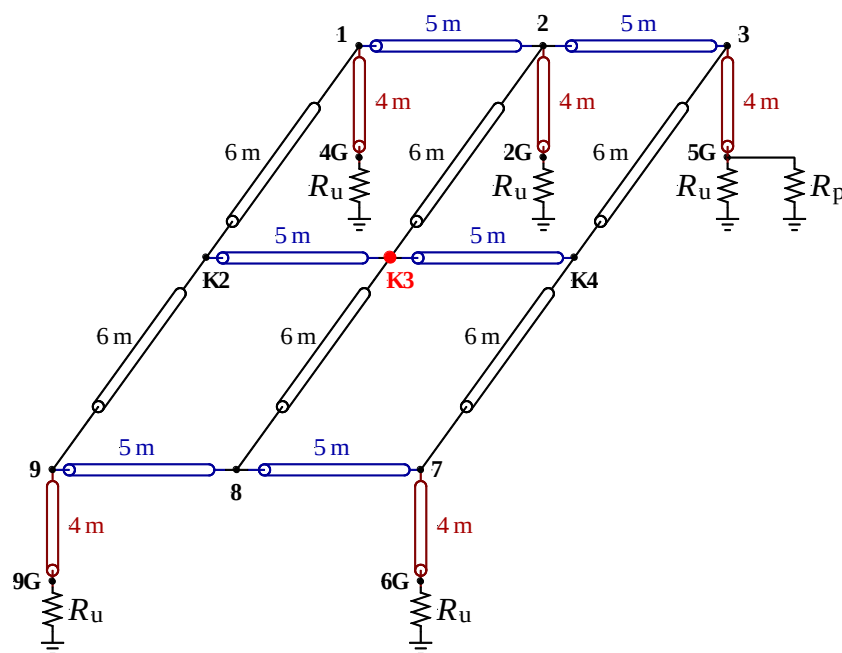
Uzemljenje objekta transformatorske stanice 10/0.4 kV se određuje na osnovu građevinskih i geoloških podataka. Kao uzemljivač se koristi temeljni uzemljivač u koji je postavljena traka od pocinkovanog čelika. Dimenzije zgrade transformatorske stanice su sledeće: dužina 12 m, širina 10.8 m, visina niže strane 5.3 m, visina više strane 4.4 m. Usvaja se srednja vrednost visine zgrade od 4.85 m. Na osnovu geoloških podataka se dobija vrsta zemljišta, sastav tla, i odgovarajuća specifična otpornost zemlje. Uobičajene vrednosti specifične otpornosti zemlje u zavisnosti od vrste tla su sledeće, ρ_{zemlje} [Ω m]: treset 20, humus 20, baštenska zemlja 40, ilovača 40, glinasta zemlja 100, peskulja 300, pesak 500, krečnjak 700, šljunkovita zemlja 3000, kamenito tlo 10000. Za posmatranu zgradu transformatorske stanice van tunela je usvojeno sledeće: glinasta zemlja, $\rho_{zemlje} = 100 \Omega$ m. Otpornost prstenastog uzemljivača je $R_{uprsten} = 5 \Omega$.

Gromobranski sistem zgrade transformatorske stanice se može modelovati, Slika 2, kao sistem vodova koji simuliraju horizontalne trake prihvatnog sistema i vertikalne trake spusnog sistema. Crveni kružić predstavlja mesto udara groma. Mrkom bojom su označeni vodovi koji predstavljaju spusne provodnike. Na mestu spoja spusnog provodnika sa uzemljivačkim sistemom postavljaju se otpornici rasprostiranja. Otpornosti otpornika rasprostiranja su $R_u = 25 \Omega$. Karakteristične impedanse vodova su $Z_c = 255 \Omega$. Brzina prostiranja elektromagnetskih talasa na vodu je $v = 3 \cdot 10^8$ m/s. Gubici u vodovima su zanemareni. Vodovi su po ivicama kvadra, čije su dimenzije usvojene kao $12 \text{ m} \times 10 \text{ m} \times 4 \text{ m}$. Postoje četiri okca $6 \text{ m} \times 5 \text{ m}$. Postoji pet spusnih vodova, $R_u = 5R_{uprsten} = 25 \Omega$.

Drugim rečima, pet zamenskih otpornosti uzemljenja $R_u = 25\Omega$ u paralelnoj vezi čine otpornost prstenastog uzemljivača $R_{uprsten} = 5\Omega$, koji je po prirodi stvari raspodeljen u prostoru. Razmak između spušnih provodnika d_s i stranica okaca mreže d_m , na objektu koji se štiti od udara groma, zavise od potrebnog nivoa zaštite: za LPL I je $d_s = 10\text{ m}$ a $d_m = 5\text{ m}$, dok za LPL II treba da je $d_s = d_m = 10\text{ m}$. U ovom slučaju se može smatrati da je praktično zadovoljen uslov za LPL II.

Otpornik R_p predstavlja ekvivalentnu otpornost bakarnog užeta, poprečnog preseka 50 mm^2 , koje spaja uzemljivač pogonske stanice sa uzemljivačem tunela od pocinkovane trake. Za poluprečnik užeta od oko 4 mm , dobija se da je $R_p = 9.5\Omega$. Drugim rečima, R_p je ekvivalentna otpornost rasprostiranja poveznog otpornika. Zbog udarnog efekta, usvaja se da samo deo bakarnog užeta aktivno učestvuje u odvođenju struje sa uzemljivača, što je procenjeno na dužinu od oko 30 m . Sa gledišta atmosferskog pražnjenja, i simulacije atmosferskog udara, energetski transformator se može modelovati kondenzatorom kapacitivnosti od 3 nF . Na osnovu simulacije udara groma i pratećih prenapona se donosi odluka da li su potrebni odvodnici i na kojim mestima ih treba postaviti.

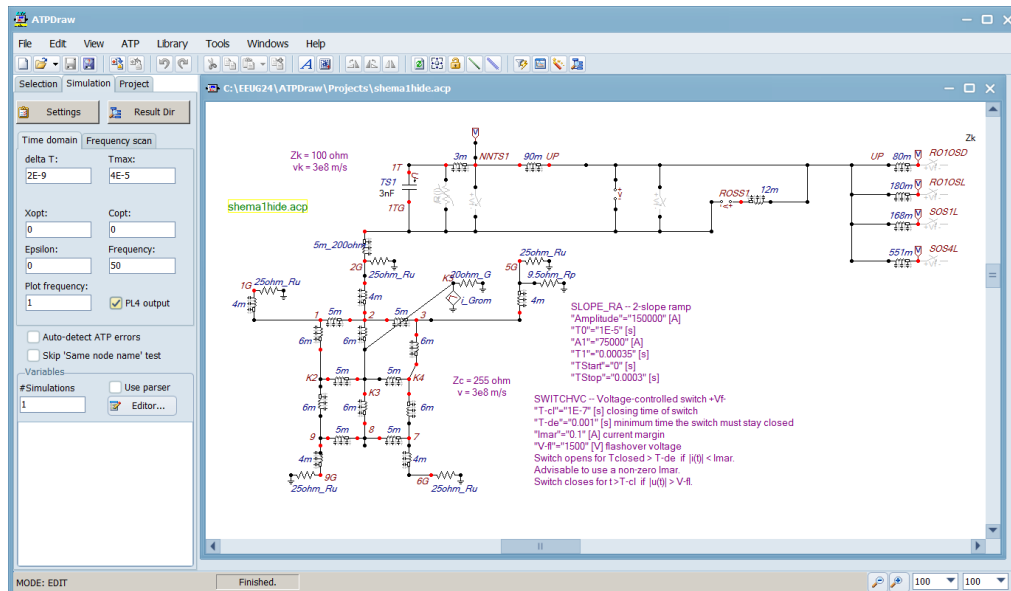
ATP-EMTP (Alternative Transients Program – ElectroMagnetic Transients Program) program se koristio za simulacije prenaponske zaštite u ovom radu. ATPDraw program je korišćen za crtanje šema koje treba simulirati ATP-EMTP programom. PlotXY program je upotrebljen za crtanje grafika.



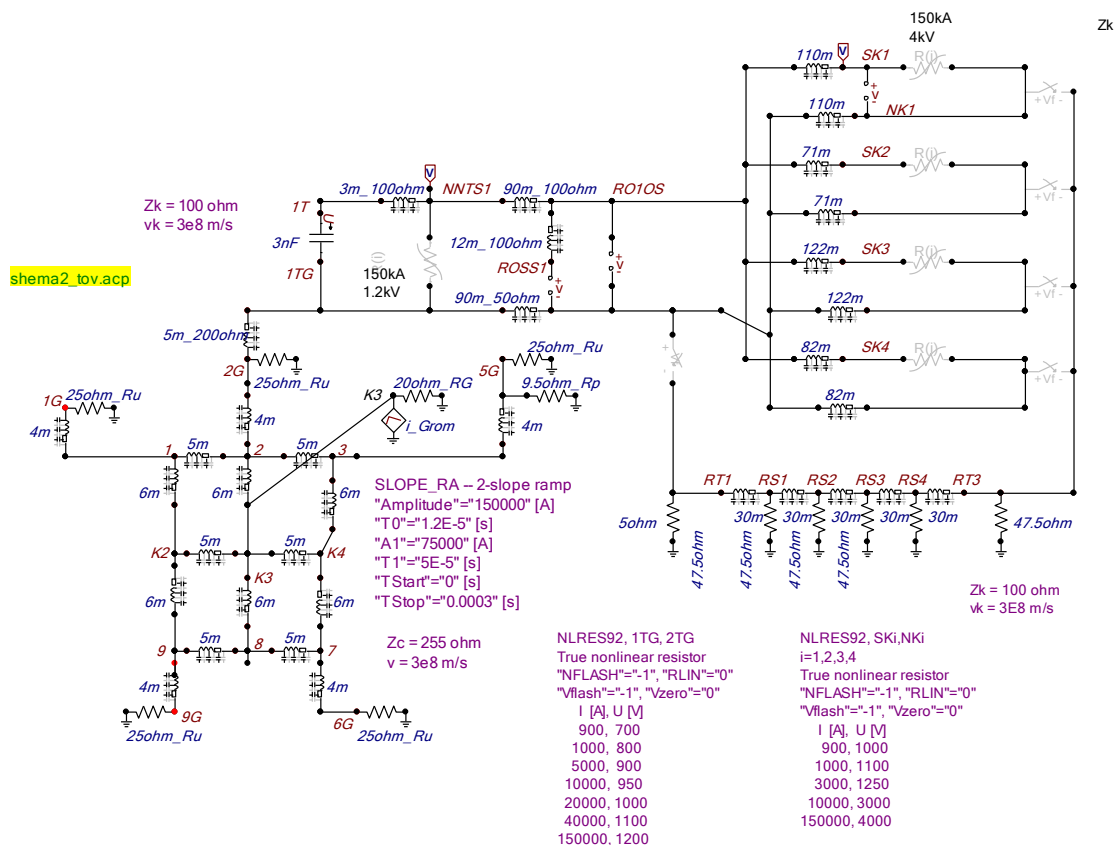
Slika 2: Modela spoljašnje gromobranske instalacije na zgradi TS koja je van tunela.

4 SIMULACIONI MODEL I REZULTATI

Osnovna uprošćena šema postrojenja bez odvodnika prenapona na kojoj su prikazani i parametri simulacije, korak po vremenu od 2 ns i dužina intervala simulacije od 40 μ s, Slika 3, i tačnija šema postrojenja, Slika 4, se prvo posmatraju. Karakteristika nelinearnog otpornika kojim se modeluje odvodnik je na Slici 5. Odgovarajući odziv je na slikama 6-11.



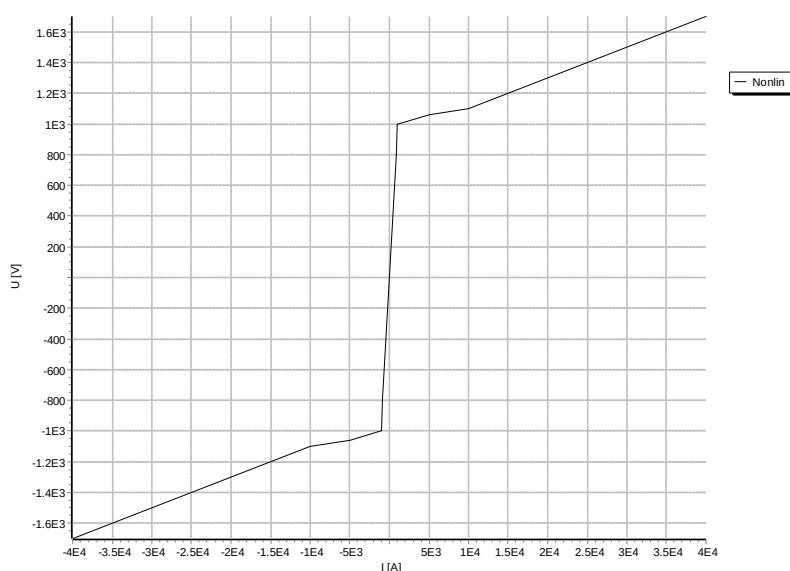
Slika 3: Uprošćena šema postrojenja bez odvodnika.



Slika 4: Tačnija šema postrojenja bez odvodnika.

Atmosfersko pražnjenje, udar groma, je simulirano strujnim izvorom kome je paralelno vezan otpornik otpornosti $20\ \Omega$. Parametri izvora "SLOPE_RA - 2-slope ramp. TYPE 13" su "Amplitude"="150000", "T0"="1E-5", "A1"="75000", "T1"="0.00035", "TStart"="0", "TStop"="0.0003". Energetski transformator se modeluje kao kondenzator, kapacitivnosti od 3 nF, za analizu prelaznih procesa usled atmosferskog pražnjenja. Sistem prihvatnih i spusnih provodnika je modelovan idealnim vodovima (svi gubici su zanemareni) sa vazдушnim dielektrikom, "LINEZT_1 - Distributed parameters, single phase", "R/l"="0", "A"="255", "B"="300000000". Kablovi su modelovani istovetno sa "A"="100".

Elementi šeme u svetlo sivoj boji predstavljaju odvodnike, koji su u ovoj analizi isključeni, i ponašaju se kao otvorene veze. Uređaj za zaštitu od prenapona je u osnovi modelovan prekidačkim elementom SWITCHVC, "T-cl"="1E-7", "T-de"="0.001", "Imar"="0.1", "V-fl"="1500". Alternativno, odvodnik se može modelovati kao nelinearni otpornik, "NLRES92 - True nonlinear resistor TYPE 92", "NFLASH"="-1", "RLIN"="0", "Vflash"="-1", "Vzero"="0". Strujno-naponska karakteristika otpornika je (I[A],V[V]); (900,800); (1000,1000); (5000,1060); (10000,1100); (40000,1700).

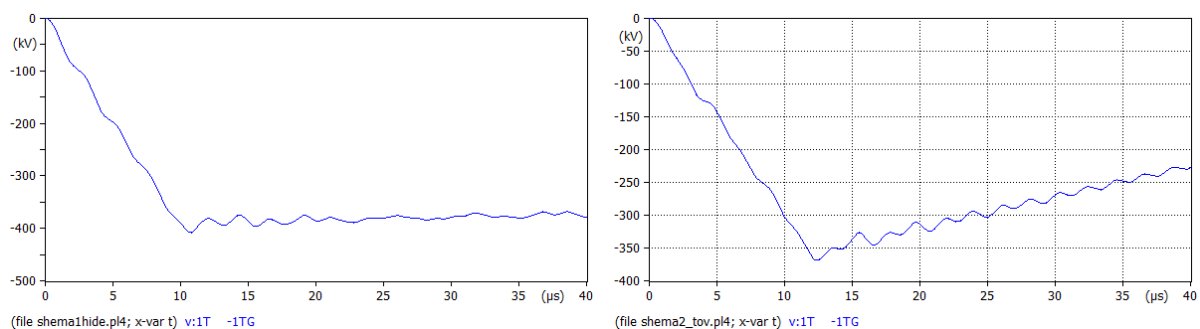


Slika 5: Karakteristika odvodnika postavljenog kod energetskog transformatora.

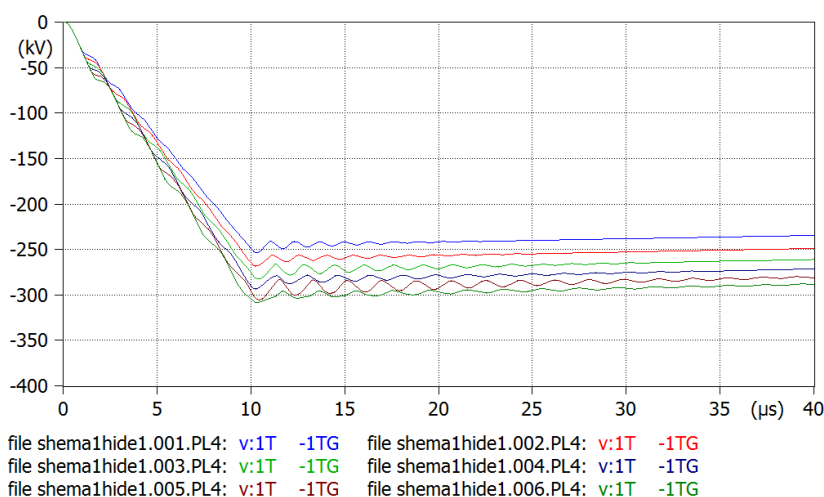
Korak po vremenu je odabran tako da se zadovolje višestruki zahtevi i njegova vrednost je kritična za dobijanje tačnih rezultata simulacije. Kao prvo, on mora biti višestruko manji od vremena uspona funkcije koja opisuje struju atmosferskog pražnjenja. Kao drugo, korak po vremenu mora biti manji od vremena potrebnog da elektromagnetski talas prođe kroz vod ili kabl, pri čemu se posmatra najkraći vod ili kabl u sistemu. „Višestruko manji” znači, na primer, pet puta manji. Strujni izvor za modelovanje struje udara groma je opisan funkcijom čije je vreme uspona 10 μ s, tako da je sa tog gledišta korak po vremenu ograničen na bar pet puta manju vrednost od 2 μ s.

Najkraći vod ili kabl na šemi ima dužinu od 3 m, tako da je vreme prostiranja na vodu/kablu 10 ns, jer je usvojena brzina prostiranja elektromagnetskih talasa na vodu/kablu od 300 m/ μ s. Sa ovog gledišta je potrebno da korak po vremenu bude bar 2 ns, ako se želi tačnija simulacija. Ovo je za više redova veličine kritičniji zahtev u odnosu na vreme uspona struje izvora, tako da su sve simulacije izvršavane sa korakom po vremenu od 2 ns.

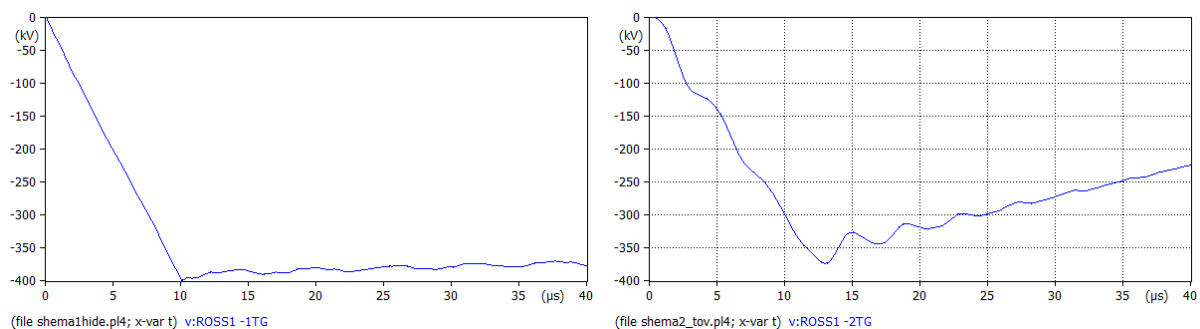
Na Slici 7 je prikazan prenapon na energetskom transformatoru kao odziv uprošćene šeme postrojenja bez odvodnika u kojoj se menja dužina kabla od 20 m do 120 m sa korakom od 20 m. Trocifren dodatak u imenu fajla sa podacima za crtanje predstavlja broj simulacije. Na primer, shema1hide1.001.PL4 znači prva simulacija, za vrednost kada je dužina 20 m.



Slika 6: Prenapon na energ. transf. u šemi bez odvodnika: LEVO uprošćena, DESNO tačnija.

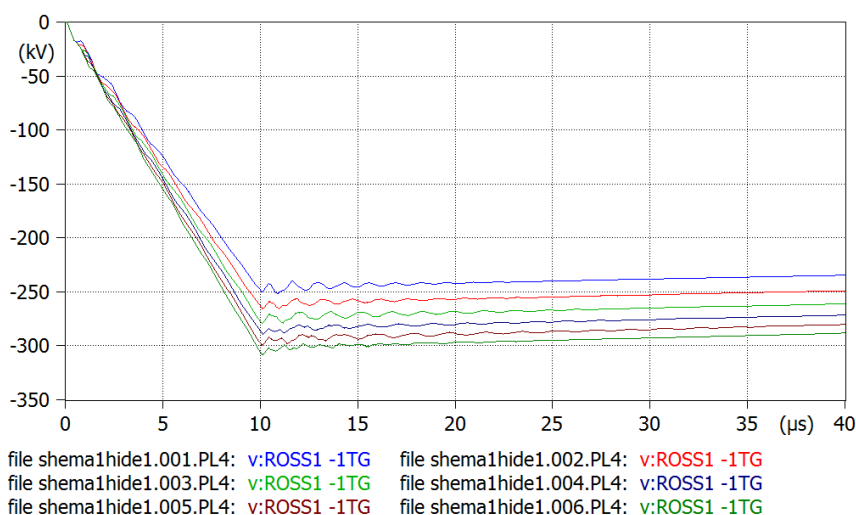


Slika 7: Prenapon na energetskom transformatoru u šemi bez odvodnika.

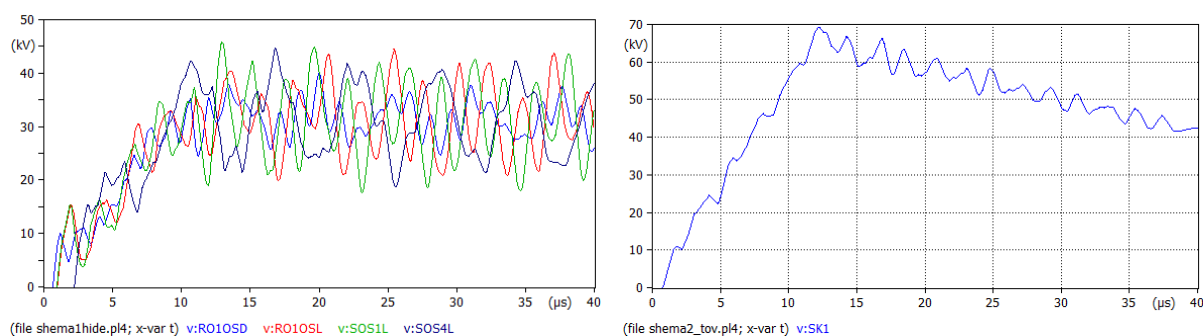


Slika 8: Prenapon na RO u šemi bez odvodnika: LEVO uprošćena, DESNO tačnija šema.

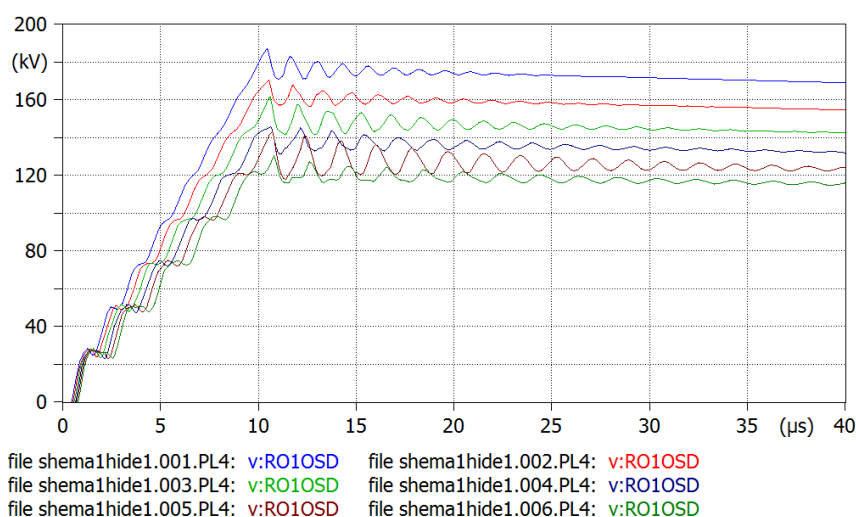
Na Slici 9 je prikazan prenapon na razvodnom ormanu. Odziv je dobijen u uprošćenoj šemi postrojenja bez odvodnika u kojoj se menja dužina kabla od 20 m do 120 m sa korakom od 20 m. Trocifren dodatak u imenu fajla sa podacima za crtanje predstavlja broj simulacije. Na primer, shema1hide1.001.PL4 znači prva simulacija, za vrednost kada je dužina 20 m.



Slika 9: Prenapon na razvodnom ormanu u uprošćenoj šemi bez odvodnika.



Slika 10: Prenapon na napoj. vodu u šemi bez odvodnika: LEVO uprošćena, DESNO tačnija.

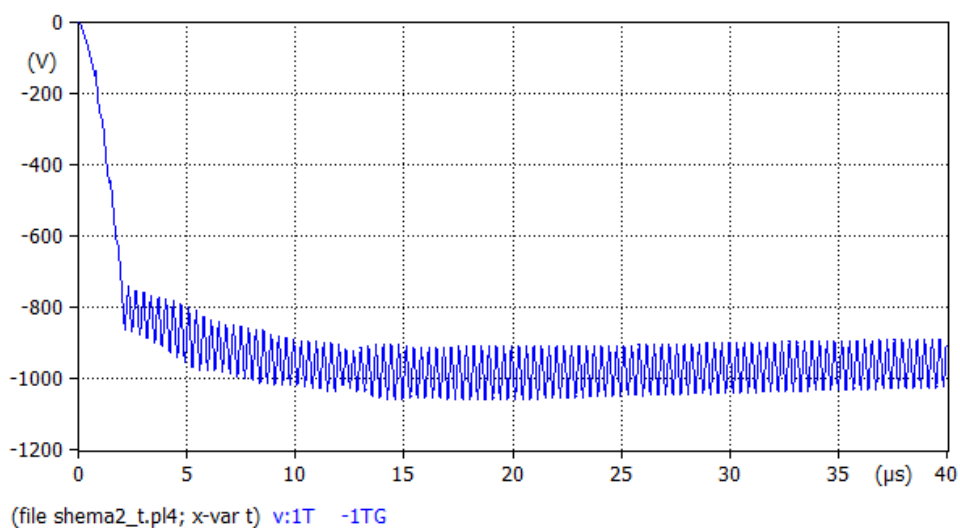


Slika 11: Prenapon na napojnom vodu u uprošćenoj šemi bez odvodnika.

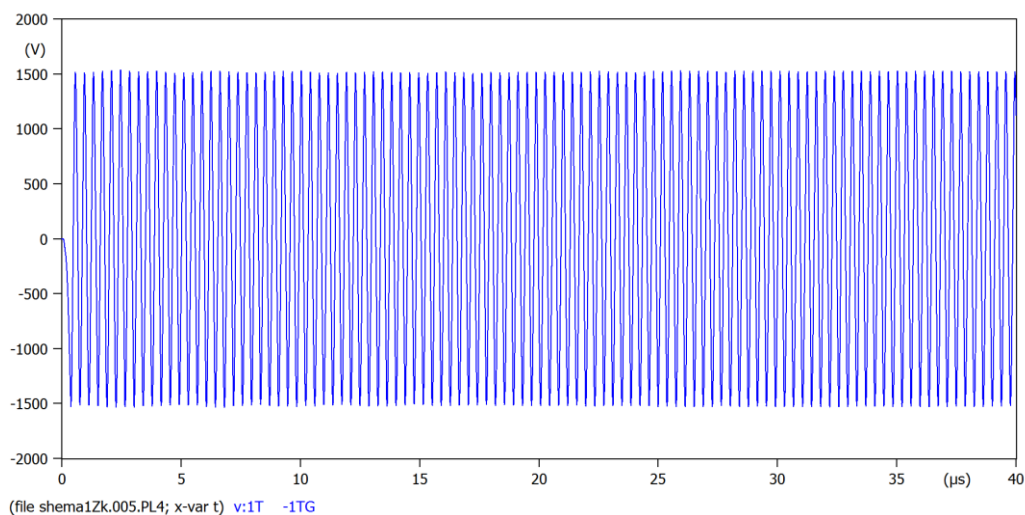
Analiza odziva na prethodnim slikama pokazuje da prenaponi usled atmosferskog pražnjenja premašuju, po modulu, dozvoljene podnosive vrednosti, što ukazuje na neophodnost postavljanja odvodnika prenapona (SPD, Surge Protective Device, uređaj za zaštitu od udara groma, koji ograničava prelazne prenapone i preusmerava udarni talas struje).

Rezultati simulacije pokazuju da uprošćena šema daje odziv koji se u saglasnosti sa odzivom tačnije, detaljnije, šeme.

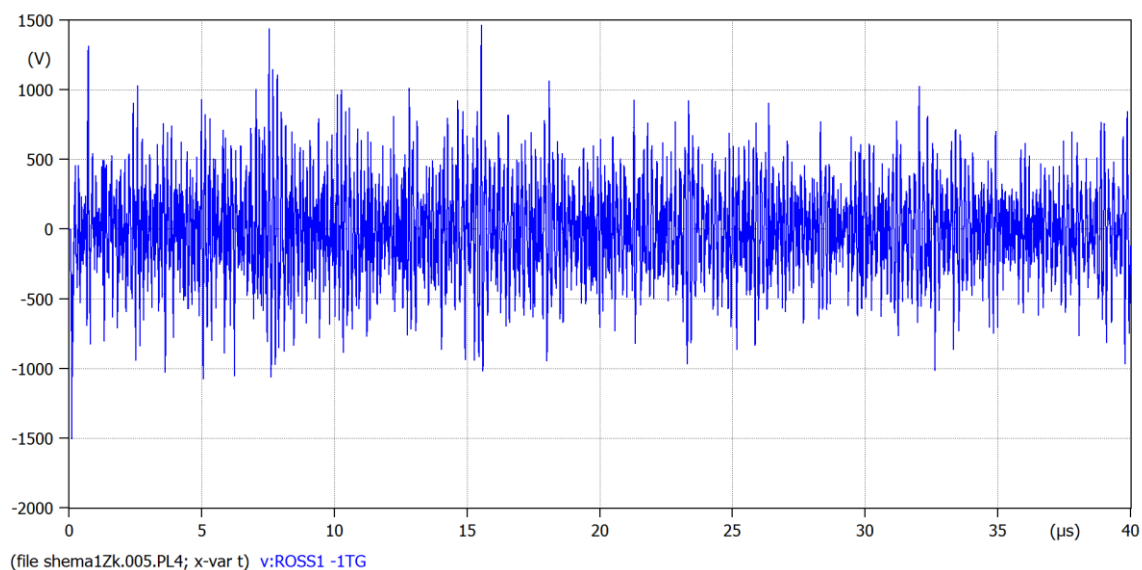
Na osnovu zaključka da je potrebna primena prenaponske zaštite, dalje se posmatra šema sa odvodnicima. Na Slici 13 je prikazan prenapon na energetskom transformatoru u uprošćenoj šemi postrojenja, sa odvodnicima kao naponski upravljanim prekidačima, kada je karakteristična impedansa kabla $120\ \Omega$. Na slikama 14 i 15 je takođe prikazan rezultat kada je karakteristična impedansa kabla $120\ \Omega$.



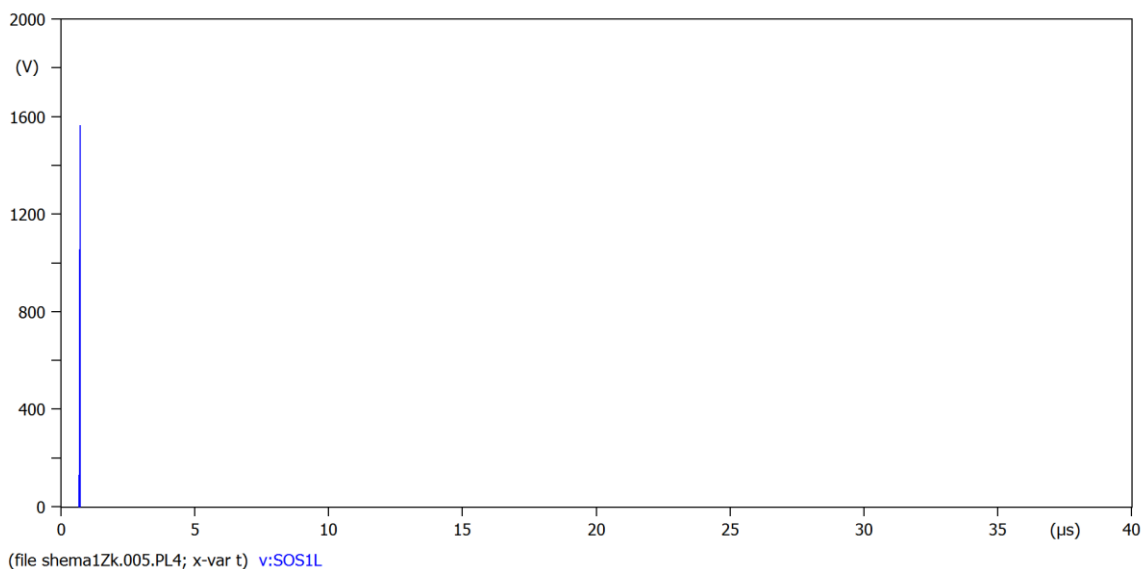
Slika 12: Prenapon na energetskom transformatoru u tačnijoj šemi sa odvodnicima.



Slika 13: Prenapon na energetskom transformatoru u uprošćenoj šemi sa odvodnicima.



Slika 14: Prenapon na razvodnom ormanu u uprošćenoj šemi sa odvodnicima.



Slika 15: Prenapon na napojnom vodu u uprošćenoj šemi sa odvodnicima.

5 ZAKLJUČAK

Gromobranska zaštita, odnosno zaštita od atmosferskog pražnjenja, je važan deo razmatranja naprava, sklopova, uređaja i postrojenja elektroenergetskog sistema. Ona je praktično neophodan segment prilikom projektovanja raznovrsnih podsistema elektroenergetskog sistema. Primarno, gromobranska zaštita se bavi zaštitom ljudi ali je od izuzetnog interesa i gromobranska zaštita objekata elektroenergetskog sistema.

U ovom radu je simulirana gromobranska zaštita jednog elektroenergetskog postrojenja, koje je u sklopu saobraćajne infrastrukture Republike Srbije, sa fokusom na realizaciju prenaponske zaštite za elektroenergetsko napajanje tunela na auto-putu. Analizirani su različiti scenariji da bi se stekao uvid u prenapone usled udara groma i njihovo ograničavanje odvodnicima prenapona. Jedan scenario koristi osnovnu uprošćenu šemu a drugi tačniju i složeniju šemu postrojenja.

Opšti zaključak je da je neophodno postaviti uređaje za zaštitu od prenapona, zato što prenaponi na pojedinim mestima, na primer na kondenzatoru kojim se modeluje energetski transformator, dostižu i do 400 kV (po modulu). Na niskonaponskoj strani 0.4 kV, na kraju napojnih kablova, prenaponi premašuju 40 kV (po modulu) što ukazuje da je potrebna prenaponska zaštita.

Jedna od smernica daljeg rada može biti promena mesta udara groma i analiza pojava prenapona za takve slučajeve. Takođe, za buduća istraživanja može biti od interesa da se posmatra više različitih matematičkih funkcija kojima se može opisati struja udara groma. Treba pomenuti i moguća ispitivanja složenijih šema-modela sa potpunijim opisom instalacija za napajanje, kao i sa različitim odvodnicima napona.

6 LITERATURA

- [1] M. Savić, Z. Stojković, Tehnika visokog napona – atmosferski prenaponi, drugo izdanje, Univerzitet u Beogradu – Elektrotehnički fakultet, 2001.
- [2] Lj. Gerić, M. Savić, Č. Vujović, Zaštita objekata od atmosferskog pražnjenja, Grafoplast, Sremska Kamenica, 2001.
- [3] T. Rajić, Gromobranska zaštita u distributivnim mrežama, predavanja sa akademskih master studija, Odsek za Energetiku, Univerzitet u Beogradu – Elektrotehnički fakultet, 2024.
- [4] S. Meyer, T. Liu, Alternative Transients Program (ATP) Rule Book, (C) 1987-2015, Canadian/American EMTP User Group, EEUG PDF version with partially updated chapters (2016), ATPRuleBook_2017.pdf, <http://www.atp-empt.org>, 2024.
- [5] H. K. Høidalen, L. Prikler, F. Peñaloza, ATPDRAW version 7.5 for Windows Users' Manual, Rel. 1.0 Nov. 2023, ATPDrawManual75.pdf, <http://www.atp-empt.org>, 2024.
- [6] SRPS EN 62305-1, Zaštita od atmosferskog pražnjenja – Deo 1: Opšti principi, 2016.
- [7] SRPS EN 62305-2, Zaštita od atmosferskog pražnjenja – Deo 2: Upravljanje rizikom, jul 2017, identičan sa EN 62305-2:2012.
- [8] SRPS EN 62305-3, Zaštita od atmosferskog pražnjenja – Deo 3: Fizičko oštećenje objekta i opasnost po život, jul 2017, identičan sa EN 62305-3:2011.
- [9] DEHN, Lightning protection guide, 3rd updated Edition, DEHN + SÖHNE GmbH + Co.KG., December 2014. ISBN 978-3-9813770-1-9