

PA 15961



UNIVERZITET U BEOGRADU
ELEKTROTEHNIČKI FAKULTET

DOKTORSKA DISERTACIJA

**ANALIZA MOGUĆNOSTI SNIŽENJA IZOLACIONIH NIVOVA
OBJEKATA VISOKIH NAPONA 400 kV, 220 kV I 110 kV
PRIMENOM MONTE KARLO SIMULACIJE**



Komisija za odbranu
doktorske disertacije:

1. Prof. dr. Milan Savić
2. Prof. dr. Jovan Nahman
3. Prof. dr. Ljubomir Gerić
4. Prof. dr. Jovan Radunović
5. Prof. dr. Milan Merkle

Datum odbrane
23.01.1998

Petar I Vukelja

УНИВЕРЗИТЕТСКА БИБЛИОТЕКА
"СВЕТЛОСЛАВ МИХАЈЛОВИЋ" - БЕОГРАД
91 Н. Бр. 107417

91 15021

UNIVERZITET U BEOGRADU
ELEKTROTEHNIČKI FAKULTET

DOKTORSKA DISERTACIJA

ANALIZA Mogućnosti sniženja izolacionih nivoa
oblasti visokih napona 400 kV, 230 kV i 110 kV
primenom Monte Carlo simulacije



Komitet za odbranu
doktorske disertacije:

1. Prof. dr. Milan Stavić
2. Prof. dr. Jovan Kabanar
3. Prof. dr. Jovan Gajić
4. Prof. dr. Jovan Kabanar
5. Prof. dr. Milan Stavić

Petar I. Vokelj

Datum odbrane
23.01.1998

KRATAK SADRŽAJ

U doktorskoj disertaciji je izvršena analiza parametara pouzdanosti objekata 400 kV, 220 kV i 110 kV standardizovanih podnosivih napona pri delovanju atmosferskih i sklopnih prenapona. U analizi je korišćena originalna metoda izračunavanja rizika preskoka, odnosno proboja sistema izolacija. Izračunavanje rizika je izvršeno na osnovu poznavanja verovatnoća preskoka, odnosno proboja jediničnih izolacija pri delovanju prenapona različite prirode. Utvrđeni su parametri pouzdanosti pri delovanju atmosferskih i sklopnih prenapona na konkretnim objektima elektroenergetskog sistema Elektroprivrede Srbije i to: nadzemnih vodova 400 kV, 220 kV i 110 kV, transformatorskih stanica 400kV/220kV, 400kV/110kV i 220kV/110kV i energetske transformatora 400kV/220kV, 400kV/110kV i 220kV/110kV. To je uradjeno za postojeću izolaciju objekata i za ostale izolacije koje su standardima predviđene za najviše napone opreme 420 kV, 245 kV i 123 kV. Izvršena je analiza mogućnosti sniženja izolacije i ustanovljeno je da se izolacije sa najnižim standardizovanim podnosivim naponima sa zadovoljavajućom pouzdanošću mogu koristiti u elektroenergetskom sistemu Elektroprivrede Srbije.

ABSTRACT

The thesis presents the reliability analysis of 400 kV, 220 kV and 110 kV networks for standardized withstand voltages, under the influence of lightning and switching overvoltages. In this analysis the original calculation method for flashover, i.e. breakdown risk, of the insulations system is used. The calculations of risks were performed on the basis of probability knowledge on flashover, i.e. breakdown of the unit insulation under the influence of different overvoltages. The parameters of the reliability are established under the influence of lightning and switching overvoltages for concrete objects of Serbian electric power system; namely: 400 kV, 220 kV and 110 kV, transmission lines, 400kV/220kV, 400kV/110kV, and 220kV/110kV transformer stations and 400kV/220kV, 400kV/110kV and 220kV/110kV transformers. This is done for insulation systems of existing objects and for all another insulation levels encountered in standards for 420 kV, 245 kV and 123 kV highest voltage of equipment. The analysis of possibility for insulation level reduction is given. Established is, that insulation with the lowest standard withstand voltages can be used with satisfactory reliability in the electric power sistem of Serbia.

Ovaj rad je rezultat dugogodišnjeg istraživanja u oblasti koordinacije izolacije prvenstveno elektroenergetskog sistema Elektroprivrede Srbije. U Elektrotehničkom Institutu "Nikola Tesla", gde sam zaposlen od 1970.godine, oblast tehnike visokih napona, posebno deo koji se odnosi na koordinaciju izolacije, je predmet istraživanja više od 40 godina. Teorijskim istraživanjima prelaznih stanja, konstrukcijom i realizacijom u Institutu naponskih mernih sistema za eksperimentalna istraživanja prenaponskih procesa u elektroenergetskom sistemu, posebno za naponske nivoe 400 kV, 220 kV i 110 kV, intenziviran je rad u oblasti prenapona i izolacija. Karakteristike realizovanih mernih sistema su takve da mogu verno reprodukovati naponske talase počevši od nekoliko desetina ns na više. Eksperimentalna istraživanja, koja su usledila u elektroenergetskom sistemu, praktično na svim naponskim nivoima, donela su veliki broj informacija o prenaponskim pojavama, odnosno, njihovim amplitudama, strminama, vremenima čela i začelja, trajanju, frekvencijama itd. Saznanja o procesima i rezultatima dobijenih eksperimentalnim istraživanjima omogućili su verifikaciju rezultata proračuna u različitim konfiguracijama elektroenergetskog sistema. Za razvoj oblasti tehnike visokih napona u Institutu prvenstveno je zaslužan izuzetan stručnjak Zlatoje Zdravković, dipl.ing., koji me je, po dolasku u Institut, uveo u teorijska i eksperimentalna istraživanja prelaznih naponskih i strujnih procesa u sistemima i ispitivanja opreme u visokonaponskoj laboratoriji. Koristeći naponske merne sisteme, čiji je on konstruktor, sa ekipom istraživača Instituta izvršio sam veliki broj eksperimentalnih istraživanja prenaponskih pojava u elektroenergetskom sistemu Jugoslavije. Uz njegovu pomoć i podršku završen je i ovaj rad, te mu se iskreno zahvaljujem.

Sadržaj

1. Uvod osnove koordinacije izolacije	1
2. Verovatnoća preskoka jedinične izolacije	3
2.1. Uvodno razmatranje	3
2.2. Krive efekta	3
2.3. Voltsekundna karakteristika	5
2.4. Utvrđivanje verovatnoće preskoka jedinične izolacije	8
3. Verovatnoća preskoka složene izolacije	9
3.1. Jedinične izolacije izložene istom naponskom talasu	9
3.2. Jedinične izolacije izložene različitim naponskim talasima	11
3.3. Verovatnoća preskoka složene izolacije kada se preskokom na jednoj ili više jediničnih izolacija menja naponsko stanje na ostalim	12
4. Rizik preskoka	14
4.1. Rizik preskoka jedinične izolacije	14
4.2. Rizik preskoka složene izolacije	17
4.3. Procena "dovoljnog" broja uzročnih događaja	18
5. Parametri pouzdanosti	22
6. Zavisnost rizika preskoka od podnosivih napona izolacije	28
7. Dekompozicija ukupnog rizika sistema na rizike podsistema izolacija i sinteza rizika preskoka podsistema izolacija	30
8. Proračun funkcija verovatnoća preskoka (proboja)-krivih efekta izolacije objekata visokih napona	33
9. Izolacija objekata visokih napona	35
9.1. Standardni podnosivi naponi izolacionih konstrukcija objekata visokih napona	35
9.2. Konverzija podnosivih napona	35
9.3. Proračun preskočnih napona vazdušnih rastojanja na bazi eksperimentalnih podataka	39
9.4. Korelacija između podnosivih napona i minimalnih vazdušnih rastojanja	41
10. Problemi pouzdanosti rada izolacije u uslovima povećanog rizika	43

11. Koordinacija izolacije objekata visokih napona 400 kV, 220 kV i 110 kV elektroenergetskog sistema EPS	49
<i>11.1. Koordinacija izolacije objekata visokih napona 400 kV, 220 kV i 110 kV u oblasti atmosferskih prenapona</i>	49
<i>11.2. Koordinacija izolacije objekata 400 kV, 220 kV i 110 kV u oblasti sklopnih prenapona</i>	122
<i>11.3. Koordinacija izolacije objekata 400 kV, 220 kV i 110 kV u oblasti atmosferskih i sklopnih prenapona</i>	169
12. Zaključci	188
LITERATURA	190

U ovom priručniku su prikazane metode i postupci za određivanje potrebne izolacije objekata visokih napona u oblasti atmosferskih i sklopnih prenapona.

Priručnik se odnosi na objekte visokih napona u elektroenergetskom sistemu EPS.

- primena svih vrsta i karakterističnih talasova,
- koordinacija izolacije objekata visokih napona (prekidači i potporučna oprema izolacionih kabineta),
- mreže i instalacije za odvodjenje prenapona u sklopnim objektima,
- određivanje potrebne izolacije objekata,
- pozicioniranje objekata i sistema,
- određivanje potrebne izolacije objekata prema različitim prenaponima, odnosno određivanje potrebne izolacije prema različitim prenaponima u opsegu izolacionih objekata.

U ovom priručniku su prikazane metode i postupci za određivanje potrebne izolacije objekata visokih napona u oblasti atmosferskih i sklopnih prenapona. Priručnik se odnosi na objekte visokih napona u elektroenergetskom sistemu EPS. Priručnik se odnosi na objekte visokih napona u elektroenergetskom sistemu EPS. Priručnik se odnosi na objekte visokih napona u elektroenergetskom sistemu EPS.

Priručnik je namenjen inženjerima i stručnjacima koji se bave projektovanjem i izradom objekata visokih napona u oblasti atmosferskih i sklopnih prenapona. Priručnik je namenjen inženjerima i stručnjacima koji se bave projektovanjem i izradom objekata visokih napona u oblasti atmosferskih i sklopnih prenapona.

- određivanje potrebne izolacije objekata visokih napona u oblasti atmosferskih i sklopnih prenapona,
- određivanje potrebne izolacije objekata visokih napona u oblasti atmosferskih i sklopnih prenapona,
- određivanje potrebne izolacije objekata visokih napona u oblasti atmosferskih i sklopnih prenapona.

Za izradu ovog priručnika, vrlo dragovoljno su se uključili stručnjaci iz Elektroenergetskog sistema EPS. Priručnik je namenjen inženjerima i stručnjacima koji se bave projektovanjem i izradom objekata visokih napona u oblasti atmosferskih i sklopnih prenapona.

1. Uvod - osnove koordinacije izolacije.

Koordinacija izolacije je oblast tehničke visokih napona koja proučava probleme izbora dielektričnih čvrstoća izolacija objekata mreža, odnosno, odgovarajućih podnosivih napona izolacija i njihovih odnosa u najširem smislu, s obzirom na naprezanja uslovljena naponima i prenaponima koji se javljaju u mreži tokom njene eksploatacije i s obzirom na potrebnu pouzdanost njenog rada, uzimajući u obzir i efekte postojećih i primenjenih zaštitnih mera i zaštitnih sredstava kao i efikasnost gromobranske zaštite. Ciljevi istraživanja koordinacije izolacije su, da se izbor izolacija opreme, postrojenja i vodova, kao i izbor zaštitnih mera i sredstava za ograničenje prenapona, u uslovima rada i očekivanih naponskih i prenaponskih naprezanja, izvrši tako, da se verovatnoće preskoka i oštećenja izolacije kao i prekida kontinuiteta rada, svedu na ekonomski i tehnički prihvatljive veličine. Za definisane konfiguracije objekata i definisane prenaponske i gromobranske zaštite kao i zahtevanu pouzdanost rada objekata, optimalno tehničko-ekonomsko rešenje koordinacije izolacije se ostvaruje primenom minimalnih potrebnih podnosivih napona svih vrsta svih izolacija kojima se postiže zahtevana pouzdanost rada objekata.

Polazeći od ovih opštih ciljeva u osnove koordinacije izolacije objekata elektroenergetskog sistema treba svrstati:

- prenapone svih vrsta u karakterističnim tačkama,
- karakteristike izolacija - funkcije verovatnoća preskoka (proboja) i podnosive napone izolacionih konstrukcija,
- mere i sredstva za ograničenje prenapona u objektima,
- efikasnost gromobranske zaštite objekata,
- pouzdanost rada objekata i sistema, i
- ekonomske aspekte realizacije objekata zahtevane pouzdanosti, odnosno, ostvarenje zahtevane pouzdanosti primenom najnižih podnosivih napona izolacija.

Što se tiče izolacije i prenapona treba imati u vidu dve bitne činjenice: svaka izolacija pokazuje različite sposobnosti podnošenja napona za različite vrste napona, odnosno, svakoj vrsti-obliku napona (prenapona) jedne te iste izolacione konstrukcije odgovara jedna funkcija verovatnoće preskoka (proboja), i, u svakom objektu teorijski se može pojaviti vrlo veliki broj prenapona različitih vrsta (oblika). Zbog ovoga, u objektu se tokom njegovog funkcionisanja stvarno uspostavlja vrlo veliki broj odnosa između prenapona i izolacija pojedinačno i grupno. Sama koordinacija, pak, zbog velikog broja vrsta prenapona, a time i funkcija verovatnoća preskoka za svaku jediničnu izolaciju, postaje, iako teorijski jasna, u praksi problem koji se vrlo teško rešava.

Problem je pojednostavljen tako što je mnoštvo vrsta napona i prenapona, polazeći od efekata na izolacijama, razvrstano u samo nekoliko grupa (vrsta). Danas su oni razvrstani u sledeće vrste: trajne napone, privremene prenapone, sporopromenljive (sklopne), brzopromenljive (atmosferske), vrlo brzopromenljive i kombinovane prenapone. Njihovi reprezentativni naponi, kojima se vrše ispitivanja izolacija kada se proverava ponašanje izolacije prema pojedinim vrstama naponskog naprezanja su:

- naizmenični kratkotrajni napon industrijske učestanosti trajanja 1 min. za privremene prenapone industrijske učestanosti,
- sklopni udarni napon oblika 250/2500 ($\mu\text{s}/\mu\text{s}$) za sporopromenljive prenapone,
- atmosferski udarni napon oblika 1.2/50 ($\mu\text{s}/\mu\text{s}$) za brzopromenljive prenapone.

Za trajne radne napone, vrlo brzopromenljive i kombinovane prenapone, reprezentativni ispitni naponi još uvek nisu određeni. Zato se vrlo brzopromenljivi i kombinovani prenaponi, za potrebe koordinacije izolacije, svrstavaju u brzopromenljive i sporopromenljive; za trajne radne napone koristi se kratkotrajni naizmenični napon industrijske učestanosti.

Prenaponi u objektima se mogu ograničavati do određenog nivoa primenom mera i sredstava zaštite, kao i izborom potrebne efikasnosti gromobranske zaštite. Skupovi ograničenih prenapona uslovljavaju manje rizike pa stoga, u principu, i niže potrebne podnosive napone.

Potrebna pouzdanost rada objekta predstavlja prvenstveno zahtev investitora s obzirom na njegov značaj, cenu i sl., i ona se u koordinaciji izolacije javlja kao polazni osnov koji se mora ostvariti. Pouzdanost objekta se izražava godišnjim brojem preskoka, ispada ili oštećenja, odnosno, vremenskim intervalom bez preskoka, ispada iz pogona ili oštećenja izolacije.

S obzirom na redukovani broj vrsta prenapona, koordinacija izolacije se danas sprovodi: u oblasti trajnih radnih napona i privremenih prenapona, u oblasti sklopnih (sporopromenljivih) prenapona i u oblasti atmosferskih (brzopromenljivih) prenapona. U svim oblastima prenapona, koordinacija izolacije obuhvata: proračune minimalnih potrebnih funkcija verovatnoća preskoka, za koje se uz racionalnu primenu zaštitnih mera i sredstava prenaponske zaštite i potrebnu efikasnost gromobranske zaštite, mogu ostvariti unapred odabrani parametri pouzdanosti. Osim ovoga razmatra se i pitanje položaja i pouzdanosti rada pojedinih izolacionih konstrukcija (energetski transformatori i sl.) ili grupe izolacija od većeg značaja za objekat, i uspostavlja među njima potreban odnos. U ovim slučajevima prethodno se vrši globalna ili detaljna dekompozicija rizika i drugih parametara pouzdanosti na pojedine izolacije ili grupe izolacija. Pri ovome se ključnim i skupim konstrukcijama daje veća pouzdanost.

Na osnovu utvrđenih potrebnih funkcija verovatnoća preskoka, odnosno, minimalnih potrebnih podnosivih napona pojedinih izolacija objekta, konačno se biraju odgovarajući standardizovani podnosivi naponi, čime se završava procedura koordinacije izolacije.

2. Verovatnoća preskoka jedinične izolacije

2.1 Uvodno razmatranje

Teorija verovatnoće je matematička disciplina koja proučava zakone slučajnih događaja. Slučajni događaj je onaj čije ostvarenje ne može tačno da se ustanovi. Utvrđuje se naime verovatnoća njegovog ostvarenja, odnosno verovatnoća njegovog pojavljivanja.

Preskok na izolaciji je slučajni događaj, jer je dielektrična čvrstoća izolacije slučajna veličina, odnosno njena sposobnost da izdrži napon određene amplitude, oblika i polariteta je slučajna veličina. Pri konstantnim meteorološkim uslovima formiranje prvih jona i razvoj preskoka (vreme razvoja preskoka) spoljašnje izolacije su slučajne veličine. Preskok koji je nastao na jednoj elementarnoj izolaciji (jediničnoj izolaciji) pri primeni napona određene amplitude, oblika i polariteta ne znači da će ponovo nastati ako se isti napon primeni.

Poznavanje verovatnoće preskoka jedinične izolacije u funkciji promene parametara (amplitude, strmine, oblika, polariteta) primenjenog napona je veoma značajno za izbor adekvatne izolacije elektroenergetskog sistema. Međutim, nema celovite spoznaje o verovatnoći preskoka jedinične izolacije u funkciji promene parametara primenjenih napona. U literaturi se uglavnom nalaze karakteristike jediničnih izolacija date u obliku:

- krive efekta,
- voltsekundne karakteristike.

Kao jedinične izolacije mogu se smatrati: jednostruki izolatorski lanac, izolaciono rastojanje između dve faze na trasi nadzemnog voda između dva susedna stuba, potporni izolator (samostalan ili u sklopu rasklopnog aparata), spoljašnja ili unutrašnja izolacija strujnog transformatora, spoljašnja ili unutrašnja izolacija naponskog transformatora itd. Sistem sa n istih ili različitih jediničnih izolacija predstavlja složenu izolaciju.

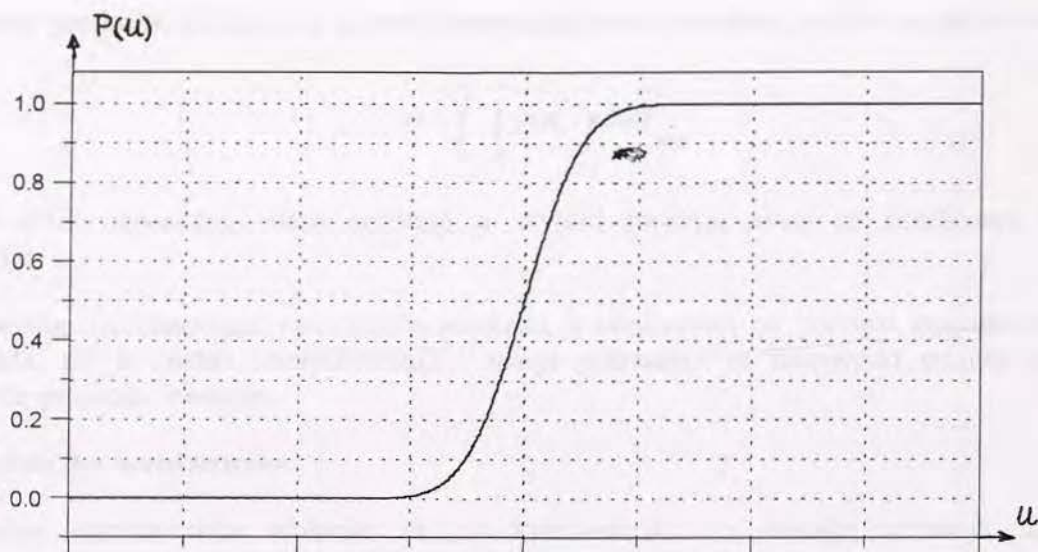
2.2 Krive efekta

Krive efekta jediničnih izolacija se utvrđuju eksperimentalnim istraživanjem i predstavljaju funkcije verovatnoće preskoka u zavisnosti od amplitude naponskog talasa. One su vezane za tačno određeni oblik ispitnog napona i određeni polaritet. Relativno se dobro mogu aproksimirati određenim analitičkim funkcijama - funkcijama raspodele verovatnoće preskoka. To je najčešće normalni zakon raspodele verovatnoće preskoka (sl. 2.2.1):

$$P(u) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^u e^{-\frac{(u-u_{50})^2}{2\sigma^2}} du \quad (2.2.1)$$

Ovde su:

- u_{50} - 50%-ni preskočni napon jedinične izolacije ili srednja vrednost preskočnog napona,
- σ - srednje kvadratno odstupanje ili standardno odstupanje koje definiše rasipanje preskočnog napona oko srednje vrednosti.



SI. 2.2.1 Kriva efekta jedinične izolacije

Za širu spoznaju verovatnoća podnošenja napona jedinične izolacije potrebno je poznavanje krivih efekta za različite oblike ispitnih napona. Dobijanje krive efekta jedinične izolacije za jedan oblik napona određenog polariteta zahteva veoma obimna eksperimentalna istraživanja i primenu velikog broja napona. Na jediničnu izolaciju u naponskom intervalu približno od 5%-nog preskočnog do 95%-nog preskočnog napona, primenjuju se naponi određenog oblika čija se amplituda postepeno povećava u približno istim koracima. Na svakom naponskom nivou primenjuje se znatan broj ispitnih napona da bi se dobila što pouzdanija kriva efekta. Odnos broja napona pri kojima je nastupio preskok i ukupnog broja primenjenih ispitnih napona predstavlja verovatnoću preskoka na istraživanom naponskom nivou, odnosno definiše jednu tačku krive efekta. Za nalaženje krive efekta u blizini 0% i 100% preskočnog napona potrebno je primeniti izuzetno veliki broj naponskih talasa.

Bilo je pokušaja da se verovatnoća preskoka izolacione konstrukcije izrazi ne samo u funkciji amplitude već i vremena do preskoka primenjenog naponskog talasa. Jedan takav interesantan pokušaj je prikazan u [6]. Izvršena su eksperimentalna istraživanja preskočnih napona na izolacionoj konstrukciji za određeni oblik naponskog talasa. Između 5% i 95% preskočnog napona utvrđen je dovoljan broj naponskih nivoa (dovoljno 10) i za sve nivoe utvrđen je određen broj preskoka, ali isti za svaki nivo. Naravno da je za niže naponske nivoe potrebno primeniti veći broj naponskih impulsa da bi se dobio potreban broj preskoka. Na osnovu rezultata eksperimentalnih istraživanja formira se funkcija dvodimenzionalne verovatnoće $p(u,t)$, gde je jedna slučajna veličina u - napon u trenutku preskoka i druga, t - vreme do preskoka. Između slučajnih veličina u i t postoji korelativna veza i ona se može izraziti koeficijentom korelacije r . Pod pretpostavkom da slučajne veličine u i t slede normalni zakon raspodele, dvodimenzionalna funkcija gustine verovatnoće se može izraziti na sledeći način:

$$p(u, t) = \frac{1}{2\pi\sigma_t\sigma_u\sqrt{1-r^2}} e^{-\frac{1}{2(1-r^2)}\left[\left(\frac{t-t_{sr}}{\sigma_t}\right)^2 - 2r\left(\frac{t-t_{sr}}{\sigma_t}\right)\left(\frac{u-u_{sr}}{\sigma_u}\right) + \left(\frac{u-u_{sr}}{\sigma_u}\right)^2\right]} \quad (2.2.2)$$

Ovde su:

u_{sr} , σ_u - parametri normalne raspodele slučajne veličine u ,

t_{sr} , σ_t - parametri normalne raspodele slučajne veličine t ,

r - koeficijent korelacije između veličina u i t .

u_{sr} , σ_u , t_{sr} , σ_t se izračunavaju iz podataka eksperimentalnih istraživanja.

Verovatnoća preskoka izolacije pri primeni naponskog talasa određenog oblika amplitude u je:

$$P(u) = \int_0^u \int_0^{\infty} p(u, t) dt du \quad (2.2.3)$$

Za svaki oblik naponskog talasa potrebno je utvrditi funkciju $p(u, t)$ za istraživanu izolacionu konstrukciju.

Ovakav pristup izračunavanja verovatnoće preskoka je obuhvatniji od pristupa izračunavanja preko krive efekta, ali je znatno komplikovaniji i manje prihvatljiv za inženjerski pristup utvrđivanja verovatnoće preskoka izolacije.

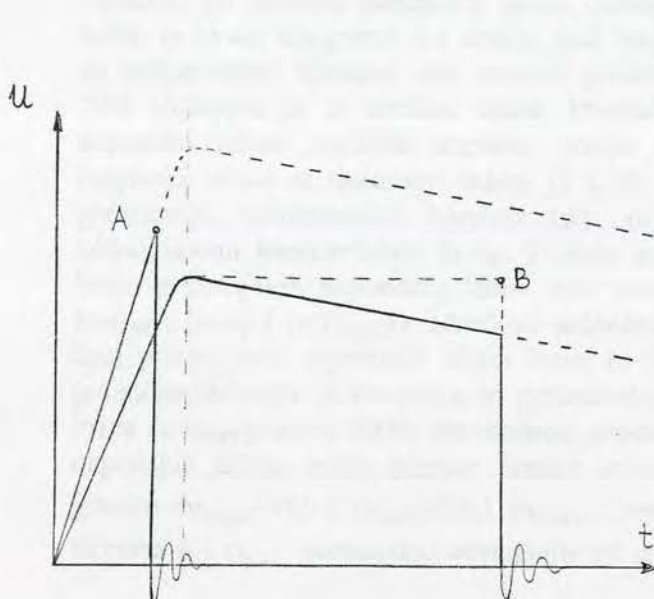
2.3 Voltsekundna karakteristika

Voltsekundna karakteristika izolacije ili $u-t$ karakteristika se, takođe, utvrđuje na osnovu eksperimentalnih istraživanja. Za njeno dobijanje je potreban, takođe, veoma veliki broj primena naponskih talasa. U propisu JUS N.A5.542/1989 voltsekundne karakteristike su "udarne karakteristike". Razlikuju se dve vrste udarnih karakteristika izolacije:

- udarna karakteristika za udare stalnog očekivanog oblika,
- udarna karakteristika za udare sa linearnim čelom.

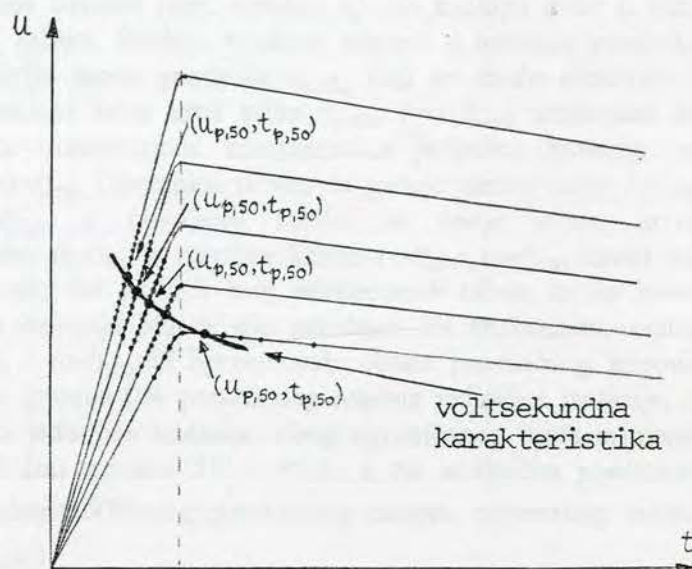
2.3.1 Voltsekundna karakteristika izolacije za određeni oblik naponskog talasa

Voltsekundna karakteristika jedinične izolacije za određeni oblik naponskog talasa (u JUS N.A5.542/1989 "Udarna karakteristika za udare stalnog očekivnog oblika"), kao i kriva efekta, se utvrđuje primenom velikog broja naponskih talasa. Za spoznaju o preskočnim karakteristikama jedinične izolacije potrebno je utvrditi voltsekundne karakteristike za veliki broj različitih oblika naponskih talasa. To je kriva koja pokazuje zavisnost preskočnog napona od vremena do preskoka. Najveća vrednost napona primenjenog talasa i vreme do preskoka određuje jednu tačku na dijagramu $u-t$. Ako se preskok javlja na čelu ili temenu talasa, tačka na dijagramu $u-t$ je ta koja odgovara trenutku preskoka (tačka A na sl. 2.3.1.1). Kada je preskok na začelju talasa tačka na dijagramu $u-t$ je određena vremenom preskoka i amplitudom primenjenog talasa (tačka B na sl. 2.3.1.1). Voltsekundna karakteristika se dobija na sledeći način. Na jediničnu izolaciju primenjuju se naponski talasi određenog oblika različite amplitude. Amplituda napona se postepeno povećava počevši od one pri kojoj za svaki talas nastupaju preskoci na čelu ili temenu ili začelju talasa, do veoma visokih vrednosti, kada preskoci nastupaju samo na čelu talasa. Za svaku novu amplitudu primenjuje se znatan broj naponskih talasa, jer preskok pri istoj amplitudi ne nastupa u istoj tački talasa, te se na dijagramu $u-t$ za jedan isti talas dobija veći broj tačaka (sl. 2.3.1.2). Za primenjene naponske talase iste amplitude izračunava se $u_{p,50}$ - napon preskoka koji se može očekivati za tu amplitudu sa verovatnoćom 50%. On se dobija kao srednja vrednost zbira napona u trenutku preskoka, kada je preskok na čelu ili temenu talasa; tačka sa naponom $u_{p,50}$ u sistemu $u-t$ se nalazi na usponskom delu primenjenih naponskih talasa iste amplitude, odnosno njena druga koordinata " t " se može izjednačiti sa srednjim vremenom do preskoka $t_{p,50}$. U slučaju preskoka na čelu, temenu i začelju talasa, $u_{p,50}$ za primenjenu amplitudu talasa se dobija kao srednja vrednost zbira napona u trenutku preskoka, kada je preskok na čelu talasa i amplitude primenjenih talasa kada je preskok na temenu i začelju talasa; za predstavljanje tačke u sistemu $u-t$, koordinata " t " se može izjednačiti sa srednjim vremenom do preskoka $t_{p,50}$ primenjenih naponskih talasa iste amplitude. Provlačenjem krive kroz tačke označene sa $(u_{p,50}, t_{p,50})$ za naponske talase različitih amplituda, dobija se voltsekundna karakteristika jedinične izolacije za istraživani oblik naponskog talasa.



SI. 2.3.1.1

Određivanje tačaka za formiranje voltsekundne karakteristike izolacije za određeni oblik naponskog talasa

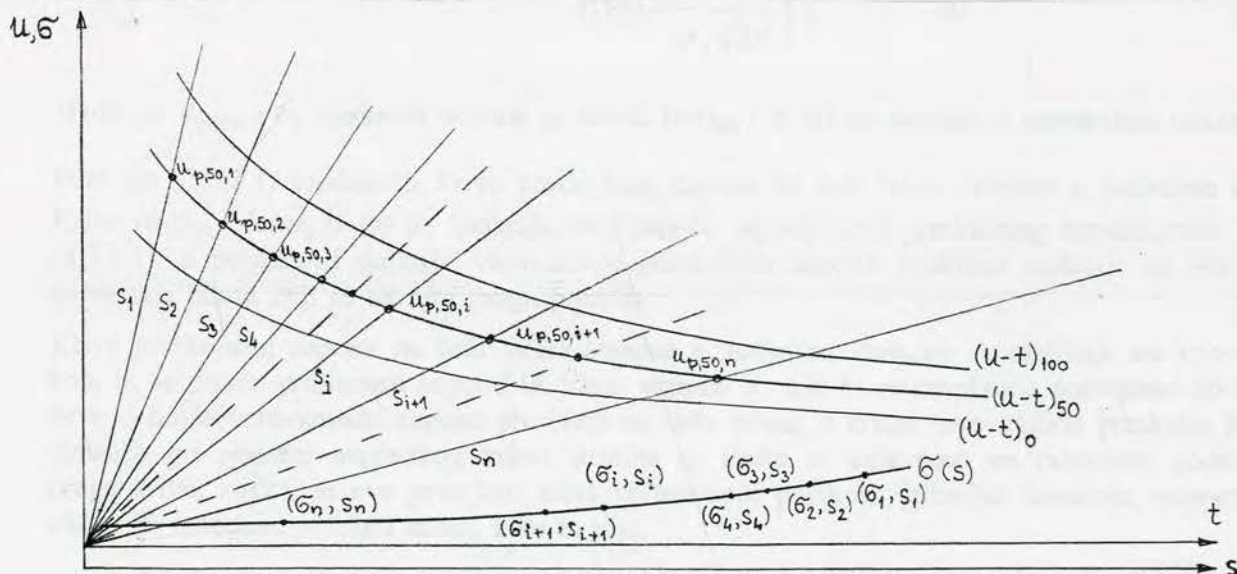


SI. 2.3.1.2

Voltsekundna karakteristika izolacije za određeni oblik naponskog talasa

2.3.2 Voltsekundna karakteristika izolacije za naponske talase sa linearnim čelom

Voltsekundna karakteristika jedinične izolacije za naponske talase sa linearnim čelom (JUS N.A5.542/1989 "Udarne karakteristike za udare sa linearnim čelom"), predstavlja krivu napona preskoka u zavisnosti od vremena do preskoka, kada preskoci nastupaju na čelu talasa. Ona se utvrđuje primenom velikog broja naponskih talasa sa linearnim čelom različitih strmina (sl. 2.3.2.1) pod uslovom da naponski talasi imaju dovoljne amplitude da bi se preskok dešavao samo na čelu talasa, a ne na temenu ili začelju.



SI. 2.3.2.1 Voltsekundne karakteristike jedinične izolacije za naponske talase sa linearnim čelom

Preskok, pri primeni naponskih talasa određene strmine (npr. strmine s_i), ne nastupa uvek u istoj tački, te se na dijagramu $u-t$ dobija veći broj tačaka. Srednja vrednost napona u trenutku preskoka na primenjenim talasima iste strmine predstavlja napon preskoka $u_{p,50,i}$ koji se može očekivati u 50% slučajeva za tu strminu talasa. Provlačenjem krive kroz tačke $u_{p,50,i}$ ($i=1,2,\dots$) izračunate za naponske talase različitih strmina, dobija se voltsekundna karakteristika jedinične izolacije za naponske talase sa linearnim čelom ili kriva $(u-t)_{50}$. Obvojnica tačaka sa gornje strane krive $(u-t)_{50}$ predstavlja voltsekundnu karakteristiku $(u-t)_{100}$, a obvojnica tačaka sa donje strane krive voltsekundnu karakteristiku $(u-t)_0$. Tačnost krive $(u-t)_{50}$, a naročito krivih $(u-t)_0$ i $(u-t)_{100}$ zavisi od broja primenjenih naponskih talasa iste strmine; što je veći broj primenjenih talasa to će krive $(u-t)_{50}$, $(u-t)_0$ i $(u-t)_{100}$ za određenu jediničnu izolaciju biti tačnije određene. Za beskonačno veliki broj primenjenih naponskih talasa krive $(u-t)_0$ i $(u-t)_{100}$ bi ograničavale oblast preskočnog napona jedinične izolacije. Kriva $(u-t)_0$ bi predstavljala granicu 0% preskočnog napona jedinične izolacije, a kriva $(u-t)_{100}$ granicu 100% preskočnog napona jedinične izolacije. Zbog ograničenog broja primena naponskih talasa jedne strmine koriste se obično granice 5% i 95%, a za analitičke predstave granice $(u_{p,50,i}-3\sigma_i)$ i $(u_{p,50,i}+3\sigma_i)$ ($u_{p,50,i}$ - vrednost 50%-nog preskočnog napona naponskog talasa strmine s_i i $\sigma_{p,i}$ - standardno odstupanje od $u_{p,50,i}$).

Voltsekundna karakteristika jedinične izolacije za naponske talase sa linearnim čelom - kriva $(u-t)_{50}$ često se koristi kao kriva verovatnoće preskoka jedinične izolacije, iako to nije; kada naponski talas predstavljen na dijagramu $u-t$ seče ili dodiruje krivu $(u-t)_{50}$ nastupa preskok, a kada se nalazi ispod krive nema preskoka. Ukoliko se to prihvata, onda se može dalje proširiti uzimajući i rasipanje preskočnog napona oko krive $(u-t)_{50}$. Za primenjene naponske talase iste strmine pored srednje vrednosti preskočnog napona $u_{p,50}$ mogla bi da se ustanovi i mera rasipanja oko srednje vrednosti. Pod pretpostavkom normalnog zakona raspodele preskočnih napona, mera rasipanja je σ - standardno odstupanje od vrednosti $u_{p,50}$. Kao i $u_{p,50}$ i σ se izračunava iz podataka o preskočnim naponima primenjenih naponskih talasa iste strmine. Dakle, za svaku strminu s_i nalazi se σ_i i može se predstaviti na istoj slici (sl. 2.3.2.1.) na kojoj je dat dijagram $(u-t)_{50}$. Kroz tačke (σ_i, s_i) povlači se kriva $\sigma(s)$ koja predstavlja promenu standardnog odstupanja u funkciji strmine primenjenog naponskog talasa. Kada se raspolože krivama $(u-t)_{50}$ i $\sigma(s)$, za bilo koju strminu s_i naponskog talasa može se formirati funkcija verovatnoće pojavljivanja preskočnog napona:

$$P_i(u) = \frac{1}{\sigma_i \sqrt{2\pi}} \int_0^u e^{-\frac{(u-u_{p,50,i})^2}{2\sigma_i^2}} du \quad (2.3.2.1)$$

Ovde su: $u_{p,50,i}$ i σ_i vrednosti očitane sa krivih $(u-t)_{50}$ i $\sigma(s)$ za strminu s_i naponskog talasa.

Funkcija (2.3.2.1) predstavlja krivu preskočnog napona na čelu talasa strmine s_i jedinične izolacije. Kriva $(u-t)_{50}$ i kriva $\sigma(s)$ uz funkciju verovatnoće pojavljivanja preskočnog napona, datu izrazom (2.3.2.1), u potpunosti definišu verovatnoće preskočnih napona jedinične izolacije za sve strmine naponskih talasa koji se na njoj mogu pojaviti.

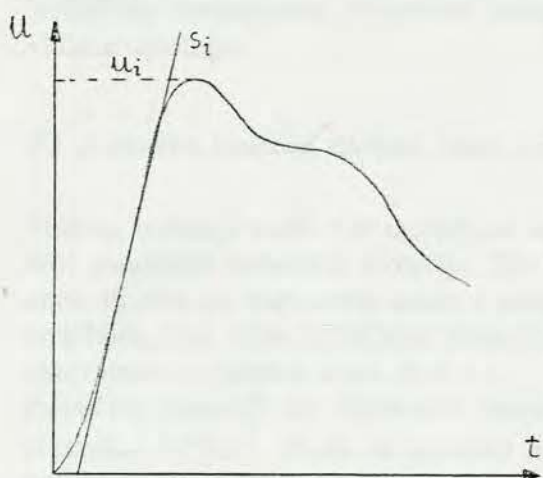
Kriva preskočnog napona na čelu talasa strmine s_i jedinične izolacije se razlikuje od krive efekta, koja bi se dobila primenom naponskih talasa strmine s_i , čija bi se amplituda postepeno povećavala. Prva definiše verovatnoću napona preskoka na čelu talasa, a druga verovatnoću preskoka jedinične izolacije pri primeni naponskog talasa strmine s_i . Pošto se uglavnom ne raspolože podacima za drugu krivu, koristi se ova prva kao kriva verovatnoće preskoka jedinične izolacije, odnosno kriva efekta za određenu strminu talasa, iako to nije.



Kriva efekta i u-t karakteristika jedinične izolacije zavise od stanja njene površine. Kod jedinične izolacije sa suvom i čistom površinom kriva efekta i u-t karakteristika su pomerene ka višim vrednostima napona u odnosu na istu jediničnu izolaciju sa zagađenom, ovlaženom ili snegom pokrivenom površinom.

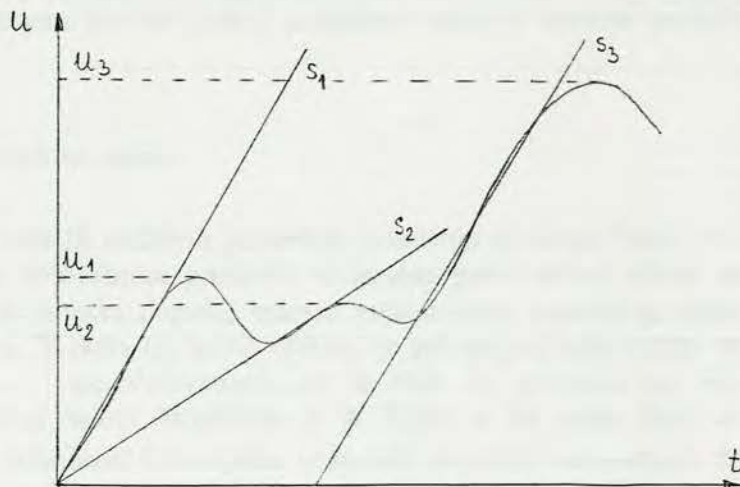
2.4 Utvrđivanje verovatnoće preskoka jedinične izolacije

Naponski talasi koji se javljaju kao posledica nekog događaja na jediničnim izolacijama sistema su različitog oblika i trajanja. Da bi se ustanovila verovatnoća preskoka jedinične izolacije pri pojavi takvog talasa na njoj, isti je potrebno aproksimirati talasom određenog oblika, odnosno strmine, za koji je poznata kriva efekta iste izolacije. Na osnovu amplitude tako aproksimiranog talasa određuje se iz krive efekta verovatnoća preskoka. Na sl. 2.4.1 prikazan je naponski talas na jediničnoj izolaciji i izvršena je aproksimacija njegovog usponskog dela određenom strminom. Za ustanovljenu strminu (s_i) iz izraza (2.3.2.1) određuje se verovatnoća preskoka (σ_i i $u_{p,50,i}$ su poznati) za maksimalnu vrednost u_i naponskog talasa. Naponske talase na jediničnim izolacijama je često nemoguće aproksimirati jednim talasom određenog oblika, odnosno strmine. Tada se on aproksimira sa više nezavisnih talasa. Na sl. 2.4.2 je prikazan jedan takav primer.



Sl. 2.4.1

Aproksimacija usponskog dela naponskog talasa određenom strminom



Sl. 2.4.2

Aproksimacija složenog naponskog talasa sa tri nezavisna talasa

Talas je razložen na tri nezavisna talasa sa strminama s_1 , s_2 i s_3 i amplitudama u_1 , u_2 i u_3 . Smatra se da prethodni naponski talas nema uticaja na ponašanje izolacije pri pojavi sledećeg, odnosno da je proteklo dovoljno vremena da se jedinična izolacija regeneriše od prethodnog naprezanja. Verovatnoća preskoka na njoj je jednaka:

$$P = P_1 + (1 - P_1) P_2 + (1 - P_1) (1 - P_2) P_3 \quad (2.4.1)$$

Ovde su:

P_1 - verovatnoća preskoka na jediničnoj izolaciji pri pojavi naponskog talasa strmine s_1 amplitude u_1 (σ_1 i $u_{p,50,1}$ su poznati),

P_2 - verovatnoća preskoka na jediničnoj izolaciji pri pojavi naponskog talasa strmine s_2 amplitude u_2 (σ_2 i $u_{p,50,2}$ su poznati),

P_3 - verovatnoća preskoka na jediničnoj izolaciji pri pojavi naponskog talasa strmine s_3 amplitude u_3 (σ_3 i $u_{p,50,3}$ su poznati).

P_1, P_2, P_3 - verovatnoća dobijene iz izraza (2.3.2.1) za amplitude napona u_1, u_2 i u_3 .

Naponski talasi amplitude u_1, u_2 i u_3 ne nastupaju istovremeno što je uvaženo u izrazu (2.4.1). Ovo upućuje na mogućnost razmatranja verovatnoće preskoka jedinične izolacije u vremenskom periodu trajanja naponskog talasa na njoj. Da bi se to uvažilo bilo bi neophodno poznavati krive efekta izolacije u kojima bi bilo uključeno i vreme do preskoka, (npr. primena dvodimenzionalna raspodela - izraz 2.2.3). Međutim, to bi veoma mnogo komplikovalo utvrđivanje verovatnoće preskoka. Uključenjem vremena do preskoka bila bi dovedena u pitanje pretpostavka o dovoljno brzom regenerisanju izolacije od prethodnog naprezanja (kada preskok nastupa na začelju talasa).

3. Verovatnoća preskoka složene izolacije

Za određivanje verovatnoće preskoka složene izolacije od n paralelnih jediničnih potrebno je poznavanje verovatnoće preskoka jediničnih izolacija, bilo preko krivih efekata za određene oblike naponskih talasa, ili preko krivih efekata za različite strmine naponskih talasa. Pretpostavlja se da je preskok kao slučajni događaj na jednoj jediničnoj izolaciji nezavisan od preskoka na drugim jediničnim izolacijama. Njegovim nastupanjem na bar jednoj jediničnoj izolaciji nastaje preskok složene izolacije.

3.1 Jedinične izolacije izložene istom naponskom talasu

Složena izolacija može biti sastavljena od istih ili različitih paralelnih jediničnih izolacija. Neka je n broj paralelnih jediničnih izolacija, čije su verovatnoće preskoka definisane preko krivih efekata za oblik ili strminu naponskih talasa i neka je uzročni događaj uslovio pojavu istog naponskog talasa amplitude u na svim jediničnim izolacijama. Iz poznatih krivih efekata za primenjeni talas nalaze se verovatnoće preskoka $P_i(u)$ ($i = 1, 2, \dots, n$). Verovatnoća da će doći do preskoka na i -toj jediničnoj izolaciji pri delovanju naponskog talasa amplitude u je $P_i(u)$, a da neće doći do preskoka $|1 - P_i(u)|$. Pošto su preskoci na jediničnim izolacijama nezavisni događaji verovatnoća da neće doći do preskoka izolacije je:

$$\prod_{i=1}^n [1 - P_i(u)],$$

a verovatnoća da će doći do preskoka složene izolacije (koristi se često termin "verovatnoća preskoka bar na jednoj jediničnoj izolaciji") je:

$$P_{\geq 1}(u) = 1 - \prod_{i=1}^n [1 - P_i(u)] \quad (3.1.1)$$

Kada su jedinične izolacije iste (neka je sa $P(u)$ označena verovatnoća preskoka svake od njih), verovatnoća da neće doći do preskoka složene izolacije je:

$$[1 - P(u)]^n,$$

a verovatnoća da će doći do preskoka na bar jednoj jediničnoj izolaciji je:

$$P_{\geq 1}(u) = 1 - [1 - P(u)]^n \quad (3.1.2)$$

Verovatnoća preskoka na jednoj jediničnoj izolaciji u sistemu složene izolacije sa n paralelnih jediničnih, pri delovanju naponskog talasa amplitude u je jednaka:

$$\begin{aligned} P_{=1}(u) &= P_1 Q_2 Q_3 \dots Q_n + P_2 Q_1 Q_3 \dots Q_n + \dots + P_n Q_1 Q_2 \dots Q_{n-1} = \\ &= P_1(1-P_2)(1-P_3) \dots (1-P_n) + P_2(1-P_1)(1-P_3) \dots (1-P_n) + P_n(1-P_1)(1-P_2) \dots (1-P_{n-1}). \end{aligned}$$

Ovde su:

$P_i(u)$ - verovatnoća preskoka na i -toj jediničnoj izolaciji ($i=1, 2, \dots, n$),

$Q_i(u) = 1 - P_i(u)$ - verovatnoća da ne dođe do preskoka na i -toj jediničnoj izolaciji ($i=1, 2, \dots, n$).

Verovatnoća preskoka na x jediničnih izolacija u sistemu složene izolacije sa n paralelnih jediničnih, pri delovanju naponskog talasa amplitude u je jednaka:

$$P_{=x}(u) = p_n(x) \quad (3.1.3)$$

$p_n(x)$ je koeficijent uz parametar λ^x u polinomu koji se dobija razvijanjem proizvoda [3]:

$$\prod_{i=1}^n [P_i(u)\lambda + Q_i(u)] \quad (3.1.4)$$

Na primer za složenu izolaciju sa tri paralelne jedinične izolacije ($n=3$) verovatnoće preskoka samo na jednoj, na dve, na tri, na bar jednoj i na bar dve jedinične izolacije se mogu dobiti razvijanjem izraza (3.1.4):

$$\begin{aligned} \prod_{i=1}^3 (P_i\lambda + Q_i) &= (P_1\lambda + Q_1)(P_2\lambda + Q_2)(P_3\lambda + Q_3) = P_1P_2P_3\lambda^3 + \\ &+ (P_1P_2Q_3 + P_1P_3Q_2 + P_2P_3Q_1)\lambda^2 + (P_1Q_2Q_3 + P_2Q_1Q_3 + P_3Q_1Q_2)\lambda + Q_1Q_2Q_3 \end{aligned} \quad (3.1.5)$$

Iz izraza (3.1.5) se može ustanoviti sledeće:

- uz parametar λ^3 koeficijent

$$P_{x=3} = P_1 P_2 P_3$$

predstavlja verovatnoću preskoka na $x=3$ jedinične izolacije;

- uz parametar λ^2 koeficijent

$$\begin{aligned} P_{x=2} &= P_1 P_2 Q_3 + P_1 P_3 Q_2 + P_2 P_3 Q_1 = P_1 P_2 (1-P_3) + P_1 P_3 (1-P_2) + P_2 P_3 (1-P_1) = \\ &= P_1 P_2 + P_1 P_3 + P_2 P_3 - 3 P_1 P_2 P_3 \end{aligned}$$

predstavlja verovatnoću preskoka na $x=2$ jedinične izolacije;

- uz parametar λ koeficijent

$$\begin{aligned} P_{x=1} &= P_1 Q_2 Q_3 + P_2 Q_1 Q_3 + P_3 Q_1 Q_2 = \\ &= P_1 (1-P_2) (1-P_3) + P_2 (1-P_1) (1-P_3) + P_3 (1-P_1) (1-P_2) = \\ &= P_1 + P_2 + P_3 - 2(P_1 P_2 + P_1 P_3 + P_2 P_3) + 3 P_1 P_2 P_3 \end{aligned}$$

predstavlja verovatnoću preskoka na $x=1$ jediničnoj izolaciji;

- zbir koeficijenata uz parametre λ^3 , λ^2 i λ

$$\begin{aligned} P_{x \geq 1} &= P_1 P_2 P_3 + P_1 P_2 Q_3 + P_1 P_3 Q_2 + P_2 P_3 Q_1 + P_1 Q_2 Q_3 + P_2 Q_1 Q_3 + P_3 Q_1 Q_2 = \\ &P_1 + P_2 + P_3 - P_1 P_2 - P_1 P_3 - P_2 P_3 + P_1 P_2 P_3 = 1 - (1-P_1) (1-P_2) (1-P_3) \end{aligned}$$

predstavlja verovatnoću preskoka na $x \geq 1$ jediničnih izolacija;

- zbir koeficijenata uz parametar λ^3 i λ^2

$$\begin{aligned} P_{x \geq 2} &= P_1 P_2 P_3 + P_1 P_2 Q_3 + P_1 P_3 Q_2 + P_2 P_3 Q_1 = \\ &= P_1 P_2 + P_1 P_3 + P_2 P_3 - 2P_1 P_2 P_3 \end{aligned}$$

predstavlja verovatnoću preskoka na $x \geq 2$ jediničnih izolacija.

3.2 Jedinične izolacije izložene različitim naponskim talasima

Ako se na n paralelnih jediničnih izolacija pri jednom uzročnom događaju pojave naponi različitog oblika (strmine) i amplitude, verovatnoća da ne dođe do preskoka složene izolacije je:

$$\prod_{i=1}^n [1 - P_i(u_i)],$$

gde je $P_i(u_i)$ verovatnoća preskoka i -te jedinične izolacije za naponski talas amplitude u_i koji se pojavio na njoj (vrednost verovatnoće preskoka se očitava sa krive efekta za ustanovljeni oblik ili strminu naponskog talasa).

Verovatnoća da će doći do preskoka na bar jednoj od n jediničnih izolacija je:

$$P_{\geq 1} = 1 - \prod_{i=1}^n [1 - P_i(u_i)] \quad (3.2.1)$$

Verovatnoća preskoka na jediničnim izolacijama: samo na jednoj, na dve, na tri itd. mogu se dobiti korišćenjem izraza (3.1.4).



3.3 Verovatnoća preskoka složene izolacije kada se preskokom na jednoj ili više jediničnih izolacija menja naponsko stanje na ostalima

Ako se pri jednom izročnom događaju (pojava napona na n paralelnih izolacija) preskokom na bilo kojoj jediničnoj izolaciji menja naponsko stanje na ostalim, izračunavanje verovatnoće preskoka na jednoj, dve ili više jediničnih izolacija znatno se komplikuje. Za njihovo izračunavanje potrebno je poznavati stanja, odnosno napone na jediničnim izolacijama do pojave promene koju je preskok izazvao, kao i posle te pojave. Pošto je preskok moguć na bilo kojoj od n jediničnih izolacija i to: samo na jednoj, na dve, na tri itd., potrebno je poznavati veoma veliki broj naponskih stanja složene izolacije za određivanje verovatnoće preskoka. Broj takvih stanja za n jediničnih izolacija je:

$$N = \frac{n!}{(n-1)!} + \frac{n!}{(n-2)!} + \dots + \frac{n!}{(n-i)!} + \dots + \frac{n!}{0!} = n! \sum_{i=1}^n \frac{1}{(n-i)!} \quad (3.3.1.)$$

Osim toga potrebno je znati verovatnoću pojavljivanja redosleda preskoka na jediničnim izolacijama (npr. ako je nastupio na dve izolacije da li je prvo nastao na i -toj ili j -toj jediničnoj izolaciji). Da bi se sagledala komplikovanost ovakvog izračunavanja uzet je primer složene izolacije samo sa tri paralelne jedinične izolacije A, B i C čije su krive efekta poznate. Za izračunavanje verovatnoće preskoka na jednoj, dve, ili tri jedinične izolacije potrebno je poznavati napone na njima za 15 različitih stanja i to:

$$\frac{3!}{(3-1)!} = 3 \quad - \text{ broj naponskih stanja kada preskok nastaje samo na jednoj izolaciji,}$$

$$\frac{3!}{(3-2)!} = 6 \quad - \text{ broj naponskih stanja kada preskok nastaje na dve jedinične izolacije,}$$

$$3! = 6 \quad - \text{ broj naponskih stanja kada preskok nastaje na tri jedinične izolacije.}$$

Verovatnoća preskoka na jednoj, dve, na tri, na bar jednoj i na bar dve jedinične izolacije dobijaju se iz sledećih izraza (koriste se relacije prethodno izvedene u delu 3.1 za složenu izolaciju od 3 paralelne jednačine, kada se naponsko stanje na ostalima ne menja pri preskoku na jednoj):

- verovatnoća preskoka na tri jedinične izolacije ($x=3$):

$$P_{x=3} = P_{ABC} P_A P_B P_C^{AB} + P_{ACB} P_A P_C P_B^{AC} + P_{BAC} P_B P_A P_C^{BA} + P_{BCA} P_B P_C P_A^{BC} + P_{CAB} P_C P_A P_B^{CA} + P_{CBA} P_C P_B P_A^{CB} \\ P_{ABC} + P_{ACB} + P_{BAC} + P_{BCA} + P_{CAB} + P_{CBA} = 1 ;$$

- verovatnoća preskoka na dve jedinične izolacije ($x=2$):

$$P_{x=2} = P_{AB} P_A P_B^A (1 - P_C^{AB}) + P_{BA} P_B P_A^B (1 - P_C^{BA}) + P_{AC} P_A P_C^A (1 - P_B^{AC}) + P_{CA} P_C P_A^C (1 - P_B^{CA}) + \\ + P_{BC} P_B P_C^B (1 - P_A^{BC}) + P_{CB} P_C P_B^C (1 - P_A^{CB})$$

$$P_{AB} + P_{BA} = 1 \quad P_{AC} + P_{CA} = 1 \quad P_{BC} + P_{CB} = 1 ;$$

- verovatnoća preskoka na jednoj jediničnoj izolaciji ($x=1$):

$$P_{x=1} = P_A (1 - P_B^A) (1 - P_C^A) + P_B (1 - P_A^B) (1 - P_C^B) + P_C (1 - P_A^C) (1 - P_B^C) ;$$

- verovatnoća preskoka na bar jednoj jediničnoj izolaciji ($x \geq 1$):

$$P_{x \geq 1} = P_{x=3} + P_{x=2} + P_{x=1};$$

- verovatnoća preskoka na bar dve jedinične izolacije ($x \geq 2$):

$$P_{x \geq 2} = P_{x=3} + P_{x=2}.$$

Ovde su:

P_A - verovatnoća preskoka jedinične izolacije A kada prvo na njoj nastupa preskok,

P_B - verovatnoća preskoka jedinične izolacije B kada prvo na njoj nastupa preskok,

P_C - verovatnoća preskoka jedinične izolacije C kada prvo na njoj nastupa preskok,

P_A^B - verovatnoća preskoka jedinične izolacije A kada je već nastupio preskok na izolaciji B,

P_A^C - verovatnoća preskoka jedinične izolacije A kada je već nastupio preskok na izolaciji C,

P_A^{BC} - verovatnoća preskoka jedinične izolacije A kada je već nastupio preskok na izolacijama B i C (prvo je nastupio preskok na B, pa onda na C),

P_A^{CB} - verovatnoća preskoka jedinične izolacije A kada je već nastupio preskok na izolacijama C i B (prvo na izolaciji C, pa onda na izolaciji B),

P_B^A - verovatnoća preskoka jedinične izolacije B kada je već nastupio preskok na izolaciji A,

P_B^C - verovatnoća preskoka jedinične izolacije B kada je već nastupio preskok na izolaciji C,

P_B^{AC} - verovatnoća preskoka jedinične izolacije B kada je već nastupio preskok na izolacijama A i C (prvo je nastupio na izolaciji A, pa onda na C),

P_B^{CA} - verovatnoća preskoka jedinične izolacije B kada je već nastupio preskok na izolacijama C i A (prvo je nastupio na izolaciji C, pa onda na A),

P_C^A - verovatnoća preskoka jedinične izolacije C kada je već nastupio preskok na izolaciji A,

P_C^B - verovatnoća preskoka jedinične izolacije C kada je već nastupio preskok na izolaciji B,

P_C^{AB} - verovatnoća preskoka jedinične izolacije C kada je već nastupio preskok na izolacijama A i B (prvo je nastupio preskok na A, pa onda na B),

P_C^{BA} - verovatnoća preskoka jedinične izolacije C kada je već nastupio preskok na izolacijama B i A (prvo je nastupio preskok na B, pa onda na A),

$P_{ABC}, P_{ACB}, P_{BAC}, P_{BCA}, P_{CAB}, P_{CBA}$ - verovatnoća redosleda preskoka kada se dešavaju na tri jedinične izolacije (npr. P_{ABC} predstavlja verovatnoću da je preskok nastao prvo na jediničnoj izolaciji A, pa onda na B i na kraju na C),

$P_{AB}, P_{BA}, P_{BC}, P_{CB}, P_{AC}, P_{CA}$ - verovatnoća redosleda preskoka kada se dešavaju na dve jedinične izolacije (npr. P_{AB} predstavlja verovatnoću da je preskok nastao prvo na jediničnoj izolaciji A, a zatim na B).

Verovatnoće preskoka se utvrđuju iz krivih efekta jediničnih izolacija za utvrđene naponske talase na njima. Verovatnoće redosleda preskoka mogu se eventualno samo proceniti iz vremenskih tokova napona na izolacijama i krivih efekata istih za te tokove napona. Da bi se i to uradilo prethodno je potrebno ustanoviti kriterijume za procenu.

4. Rizik preskoka

4.1. Rizik preskoka jedinične izolacije

Kada pri pojavi uzročnih događaja (udar groma, sklopna operacija i sl.) na jediničnoj izolaciji deluju prenaponi čija je gustina raspodele $p(u)$, onda je verovatnoća nastajanja prenapona između u' i $u'+du$ jednaka $p(u')du$. Ako jedinična izolacija za nastale prenapone, pri pojavi ovih uzročnih događaja, ima krivu efekta definisanu izrazom $P(u)$, verovatnoća preskoka pri pojavi prenapona između u' i $u'+du$, odnosno elementarni rizik preskoka u intervalu du je definisan izrazom:

$$dR = p(u')P(u')du \quad (4.1.1.)$$

Rizik preskoka na jediničnoj izolaciji u celom opsegu prenapona nastalih pri delovanju istovrsnih uzročnih događaja (npr. udar groma) je jednak:

$$R = \int_0^{\infty} p(u)P(u)du. \quad (4.1.2.)$$

Treba naglasiti da promenljiva u funkcije $p(u)$ predstavlja maksimalni prenapon na jediničnoj izolaciji.

Izraz za rizik preskoka, dakle, zasniva se na poznavanju dve funkcije: krive efekta - $P(u)$ i gustine raspodele prenapona - $p(u)$.

Prenaponi koji se pojavljuju na jediničnoj izolaciji pri istovrsnim uzročnim događajima ne moraju da imaju, a najčešće i nemaju iste oblike, polaritet i amplitude. Prema tome rizik preskoka, definisan izrazom (4.1.2.), se ne može prihvatiti kao opšti izraz. Prema krivoj efekta $P(u)$ on važi samo kada se na jediničnoj izolaciji pojavljuju prenaponi istog oblika i polariteta ili iste strmine i polariteta, a različite amplitude.

Funkcije gustine raspodele prenapona $p(u)$ najčešće nisu poznate i utvrđuju se eksperimentalno ili proračunom primenom "dovoljnog" broja istovrsnih uzročnih događaja. Dovoljan broj istovrsnih uzročnih događaja može da bude od nekoliko događaja do nekoliko stotina hiljada događaja i zavisi prvenstveno od tačnosti utvrđivanja funkcije gustine raspodele prenapona, posebno u delu izrazito visokih prenapona, i vrste uzročnog događaja. Dobijeni prenaponi tada predstavljaju reprezentativan uzrok koji sasvim dobro karakteriše osnovni skup.

Funkcije $p(u)$ dobijene proračunima ili eksperimentima, mogu da se predstavje u vidu kontinualnih ili diskretnih. Ustanovljavaju se na osnovu utvrđenih histograma prenapona u domenu $u_{min} - u_{max}$ (u_{min} i u_{max} su minimalni i maksimalni prenapon u uzorku). Na osnovu histograma prenapona i empirijske funkcije raspodele pretpostavlja se teorijska raspodela sa kojom empirijska funkcija treba da ima dobro slaganje. Podesnim kriterijumima (χ^2 test, test Kolmogorova, test Jastremskog i dr.) utvrđuje se slaganje pretpostavljene teorijske i empirijske raspodele. Kao teorijske raspodele se koriste: normalna, ograničena normalna, logaritamska normalna, eksponencijalna, Vejbulova i dr.

Međutim, kada se prenaponi posmatraju kao diskretne slučajne veličine, što i jesu u reprezentativnom uzorku od u_{min} do u_{max} sa N članova, onda se dobija sledeći izraz za rizik preskoka jedinične izolacije reprezentativnog uzorka:

$$R_{uz} = \int_{u_{min}}^{u_{max}} p(u)P(u)du = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N P(u_i) \quad (4.1.3.)$$

Izraz (4.1.3.) predstavlja ustvari srednju vrednost verovatnoće preskoka jedinične izolacije pri pojavi prenapona istog oblika i polariteta ili iste strmine i polariteta iz reprezentativnog uzorka. Koristeći prethodno, može se uopštiti izraz za rizik preskoka jedinične izolacije reprezentativnog uzorka:

$$R_{uz} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N P_i(u_i) \quad (4.1.4.)$$

$P_i(u_i)$ je verovatnoća presoka pri pojavi prenapona u_i utvrđena iz krive efekta za oblike ili strmine i polaritete prenapona kakav je prenapon u_i .

Tačna vrednost rizika preskoka se dobija kada N teži beskonačnosti:

$$R_{N \rightarrow \infty} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N P_i(u_i) . \quad (4.1.5.)$$

Vrednost $P_i(u_i)=x_i$ se menja od jednog do drugog istovrsnog uzročnog događaja i može se posmatrati kao nezavisna slučajna veličina. Kao takva ima svoju empirijsku funkciju gustine raspodele $p[P_i(u_i)]=p(x_i)$. Iz nje se može konstatovati sa kojom se učestanošću pojavljuju verovatnoće preskoka pri dejstvu N istovrsnih uzročnih događaja iznad određene razmatrane vrednosti, odnosno u opsegu razmatranih vrednosti, ili koji broj uzročnih događaja od N prethodno izvedenih dovodi do pojave verovatnoće preskoka iznad određene razmatrane vrednosti, odnosno u opsegu razmatranih vrednosti. Empirijska funkcija gustine raspodele $p(x_i)$ može da se aproksimira sa teorijskom funkcijom $f(x)$. Na taj način se ostvaruje mogućnost procene verovatnoće sa kojom se može očekivati verovatnoća preskoka x i van opsega u kome je ustanovljen rizik pri N istovrsnih događaja. Da bi procena bila što tačnija potrebno je da slaganja empirijske i teorijske raspodele bude što bolja. Iz tako utvrđene teorijske raspodele može se dobiti najčešće očekivana verovatnoća preskoka $x_{0,5}$ iz izraza:

$$\int_0^{x_{0,5}} f(x) dx = 0.5 . \quad (4.1.6.)$$

Takođe se sa zadanom pouzdanošću α može proceniti verovatnoća preskoka veća od x_α iz izraza:

$$1 - \int_0^{x_\alpha} f(x) dx = \alpha , \quad (4.1.7.)$$

odnosno, proceniti pouzdanost α sa kojom se može pri jednom uzročnom događaju očekivati verovatnoća preskoka na jediničnoj izolaciji veća od x_α .

Rizik preskoka na jediničnoj izolaciji može se takođe utvrditi ako se poznaju $(u-t)_{50}$ - voltsekundna karakteristika jedinične izolacije i $p(u,s)$ - funkcija gustine raspodele prenapona amplitude " u " i strmine " s ", odnosno $p(u,t)$ - funkcija gustine raspodele prenapona amplitude " u " i vremena čela " t ". Dobija se iz sledećeg izraza:

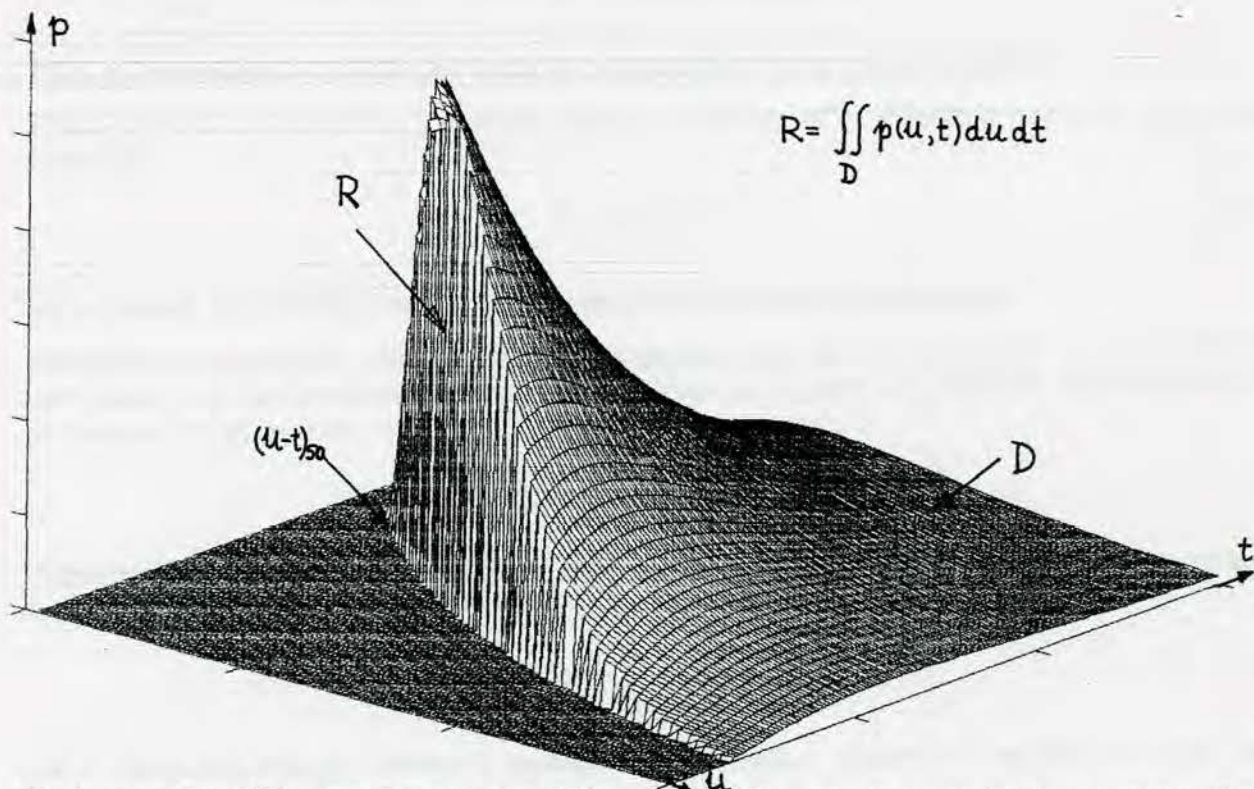
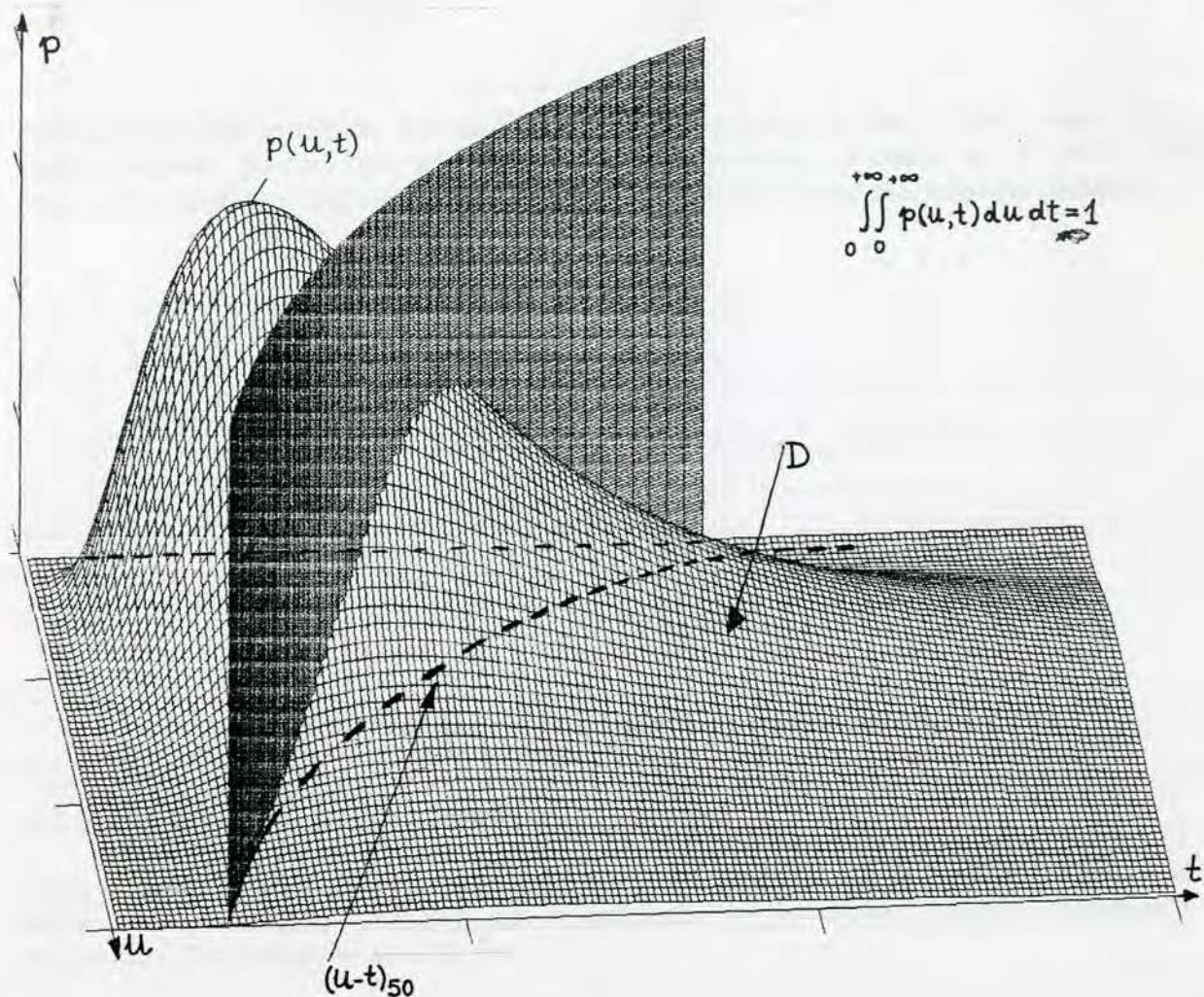
$$R = \int_D \int p(u,t) du dt . \quad (4.1.8.)$$

Pojavom prenapona čije karakteristike " u " i " t " pripadaju oblasti D , a to je oblast iznad krive $(u-t)_{50}$, nastupa preskok na jediničnoj izolaciji. Ako se umesto krive $(u-t)_{50}$ koriste krive $(u-t)_0$ i $(u-t)_{100}$ oblast D se proširuje ili smanjuje, a ustanovljeni rizici preskoka predstavljaju granice intervala u kojima se kreće stvarna vrednost rizika preskoka jedinične izolacije. Na sl. 4.1.1. data je grafička predstava određivanja rizika preskoka iz izraza (4.1.8.).

Za proračun rizika preskoka jedinične izolacije pri udaru groma, umesto poznavanja funkcije $p(u,t)$, dovoljno je znati $p(i,s)$ - funkcija gustine raspodele struja groma amplitude " i " i strmine " s ". Rizik se utvrđuje iz sledećeg izraza:

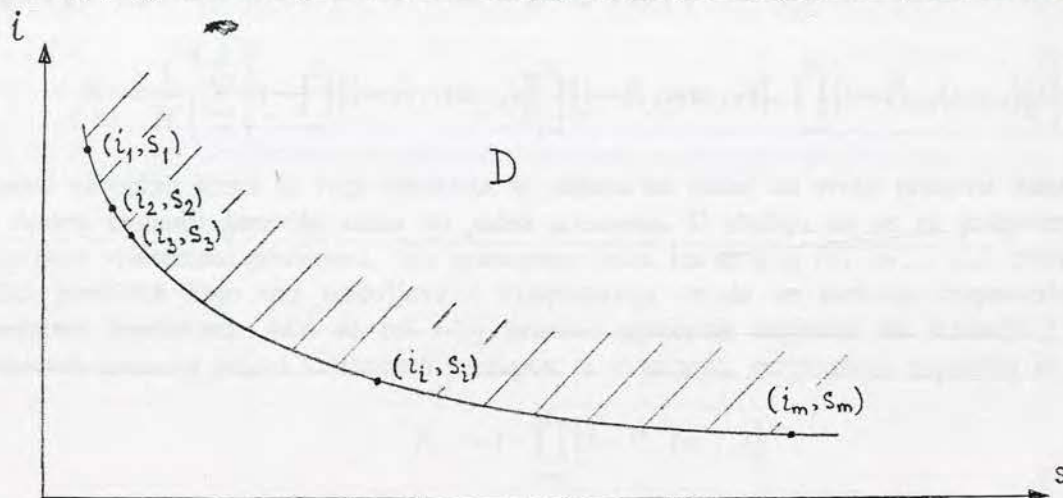
$$R = \int_D \int p(i,s) di ds . \quad (4.1.9.)$$

Oblast D se utvrđuje na sledeći način. Za struju groma strmine s_i utvrđuje se proračunom amplituda struje i_i pri kojoj nastupa preskok na razmatranoj izolaciji u posmatranoj konfiguraciji i dobija se jedna tačka (i_i, s_i) na dijagramu na sl. 4.1.2. To se uradi za struje groma različitih strmina od najmanjih do najvećih i utvrde se tačke $(i_1, s_1), (i_2, s_2), \dots, (i_m, s_m)$ na dijagramu na sl. 4.1.2. Spajanjem tih tačaka dobija se kriva opasnih parametara. Udari groma čija je amplituda struje za zadatu strminu iznad krive opasnih parametara dovode do preskoka na jediničnoj izolaciji. Preskok nastupa kada naponski talas na jediničnoj izolaciji dostigne odgovarajuću vrednost napona na voltsekundnoj karakteristici $(u-t)_{50}$. Ako se umesto krive $(u-t)_{50}$ koriste krive $(u-t)_0$ i $(u-t)_{100}$



Sl.4.1.1. Grafička predstava određivanja rizika preskoka kada je poznata funkcija gustine raspodele prenapona $p(u,t)$, gde su u -amplituda i t -vreme čela prenapona

dobijaju se, pored postojeće, dve nove krive opasnih parametara koje definišu svoje oblasti D u kojima nastupa preskok pri udaru groma. Rizici preskoka utvrđeni za te nove oblasti D predstavljaju granice u kojima se kreće stvarna vrednost rizika preskoka jedinične izolacije.



Sl. 4.1.2. Određivanje oblasti opasnih parametara pri udaru groma

4.2. Rizik preskoka složene izolacije

Kada skupovi prenapona gustina raspodela $p_j(u)$, gde je $j=1,2,\dots,n$ redni broj jedinične izolacije, deluju na sistem složene izolacije od n jediničnih pri istovrsnim uzročnim događajima rizik preskoka na j -toj jediničnoj izolaciji je:

$$R_j = \int_0^{+\infty} p_j(u) P_j(u) du \quad (4.2.1)$$

$P_j(u)$ je kriva efekta j -te jedinične izolacije za prenapone istog oblika i polariteta.

Rizik preskoka na bar jednoj jediničnoj izolaciji u sistemu od n jediničnih može se samo proceniti iz izraza:

$$R \approx 1 - \prod_{j=1}^n (1 - R_j), \quad (4.2.2)$$

jer ne postoji funkcionalna veza između prenapona na pojedinim izolacijama.

Prenaponi su stohastičke veličine. Pri i -tom događaju na n izolacija pojavljuje se n prenapona koji čine jedan član - n komponentni član uzorka. Dejstvom N istovrsnih događaja dobija se uzorak od N članova. Rizik preskoka uzorka se nalazi iz sledećeg izraza:

$$R_{uz} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left\{ 1 - \prod_{j=1}^n [1 - P_{i,j}(u_{i,j})] \right\}. \quad (4.2.3)$$

Tačna vrednost rizika preskoka složene izolacije pri delovanju skupa prenapona se dobija kada N teži beskonačnosti:

$$R_{N \rightarrow \infty} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left\{ 1 - \prod_{j=1}^n [1 - P_{i,j}(u_{i,j})] \right\}. \quad (4.2.4)$$

Za n identičnih izolacija, izloženih prenaponu istog oblika, polariteta i amplitude u toku jednog istovrsnog događaja, izraz (4.2.4.) postaje:

$$R_{N \rightarrow \infty} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left\{ 1 - [1 - P_i(u_i)]^n \right\}. \quad (4.2.5)$$

Ako se sistem sastoji od q grupa izolacija sa po n_1, n_2, \dots, n_q jediničnih izolacija (grupe izolacija po fazama, grupe međufaznih izolacija, grupe izolacija jednog dela objekta i sl.) čije su krive efekta $P_{j,q}(u)$, pri dejstvu N istovrsnih uzročnih događaja rizik preskoka prema izrazu (4.2.4) postaje:

$$R_{N \rightarrow \infty} = \frac{1}{N} \left\{ \sum_{i=1}^N \left[1 - \prod_{j=1}^{n_1} [1 - P_{i,j,1}(u_{i,j,1})] \prod_{j=1}^{n_2} [1 - P_{i,j,2}(u_{i,j,2})] \dots \prod_{j=1}^{n_q} [1 - P_{i,j,q}(u_{i,j,q})] \right] \right\}. \quad (4.2.6)$$

Napred navedeni izrazi za rizik preskoka se odnose za slučaj da svaka primena uzročnog događaja na svakoj izolaciji generiše samo po jedan prenapon. U slučaju da se na jediničnim izolacijama pojavljuju višetemeni prenaponi, više prenapona jedan iza drugog (u_1, u_2, \dots, u_w), potrebno je uvažiti rizike preskoka koje oni uslovljavaju. Pretpostavlja se da se izolacija regeneriše između dva uzastopna prenapona. Ako se pri i -toj primeni uzročnog događaja na izolaciji j sistema sa n jediničnih izolacija pojavi višetemeni prenapon sa w temena, verovatnoća preskoka je:

$$P_{i,j} = 1 - \prod_{r=1}^w [1 - P_{i,j}(u_{i,j,r})] \quad (4.2.7)$$

($u_{i,j,r}$ - prenapon pri i -toj primeni uzročnog događaja na j -toj jediničnoj izolaciji, r -tog temena);
verovatnoća preskoka na svih n jediničnih izolacija pri i -tom uzročnom događaju je:

$$P_i = 1 - \prod_{r=1}^{w_1} [1 - P_{i,1}(u_{i,1,r})] \prod_{r=1}^{w_2} [1 - P_{i,2}(u_{i,2,r})] \dots \prod_{r=1}^{w_n} [1 - P_{i,n}(u_{i,n,r})] = 1 - \prod_{j=1}^n \left\{ \prod_{r=1}^{w_j} [1 - P_{i,j}(u_{i,j,r})] \right\}. \quad (4.2.8)$$

Rizik preskoka u sistemu od n jediničnih izolacija, pri delovanju različitih višetemenih prenapona, primenom N istovrsnih uzročnih događaja može se dobiti iz izraza:

$$R_{N \rightarrow \infty} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left\{ 1 - \prod_{j=1}^n \prod_{r=1}^{w_j} [1 - P_{i,j}(u_{i,j,r})] \right\}. \quad (4.2.9)$$

Izrazi (4.2.7.), (4.2.8.) i (4.2.9.) važe ako se višetemeni prenapon na jediničnoj izolaciji ne menja pri preskoku na jednom od temena.

Iznetim pristupom omogućeno je izračunavanje rizika preskoka u sistemima složenih izolacija pri delovanju prenapona složenih oblika.

Pri utvrđivanju rizika preskoka na j -toj jediničnoj izolaciji u okviru sistema složene izolacije od n jediničnih, pri dejstvu N istovrsnih uzročnih događaja, moguće je u proračunu uvažiti preskoke na ostalim jediničnim izolacionim konstrukcijama. Na taj način se ustanovljava realnija vrednost rizika preskoka na posmatranoj j -toj jediničnoj izolaciji. Za svaku jediničnu izolaciju, osim posmatrane, zadaje se preskočni napon pri delovanju prenapona u toku i -tog događaja. Dostizanjem preskočnog napona na nekoj od jediničnih izolacija nastupa preskok i dolazi do promene naponskog stanja na ostalim jediničnim izolacijama. Pri pojavi i -tog događaja, na posmatranoj j -toj jediničnoj izolaciji se utvrđuje maksimalni prenapon i iz krive efekta za oblik ili strminu se određuje verovatnoća preskoka ($P_{i,j}$). Rizik preskoka j -te jedinične izolacije (R_j) se dobija iz izraza (4.14). Vrednosti preskočnih napona mogu da se biraju Monte-Karlo simulacijom iz krivih efekta jediničnih izolacija za ustanovljene oblike ili strmine prenapona, ili uz pojednostavljenje, za njih mogu da se usvoje vrednosti 50% preskočnih napona jediničnih izolacija, takođe utvrđene iz krivih efekta.

4.3 Procena "dovoljnog" broja uzročnih događaja

Rizik preskoka R složene izolacije od n jediničnih, utvrđen iz uzroka, predstavlja srednju vrednost verovatnoća preskoka koje su dobijene za svaki od N izvedenih uzročnih događaja:

$$R = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left[1 - \prod_{j=1}^n [1 - P_{i,j}(u_{i,j})] \right] \quad (4.3.1.)$$

($P_{i,j}$ - verovatnoća preskoka j -te jedinične izolacije pri pojavi prenapona $u_{i,j}$ u toku i -tog uzročnog događaja).

Ako se sa R_i označi verovatnoća preskoka složene izolacije pri i -tom događaju:

$$R_i = 1 - \prod_{j=1}^n [1 - P_{i,j}(u_{i,j})], \quad (4.3.2.)$$

onda je rizik preskoka:

$$R = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N R_i. \quad (4.3.3.)$$

Vrednost R je slučajna veličina; menja se od uzorka do uzorka. Kada N teži beskonačnosti vrednost R teži srednjoj vrednosti μ osnovnog skupa. Pošto se R nalazi iz uzorka sa konačnim brojem članova N , potrebno je proceniti kolika su moguća odstupanja od srednje vrednosti μ osnovnog skupa, odnosno u kom intervalu će se nalaziti R sa pouzdanošću α . Ovaj problem nije jednostavan. Lakše se rešava kada empirijska funkcija raspodele uzorka (R_1, R_2, \dots, R_N) sledi neki od poznatih zakona raspodele. Kada uzorak (R_1, R_2, \dots, R_N) pripada osnovnom skupu sa normalnom raspodelom čiji su parametri μ - srednja vrednost i σ - standardno odstupanje, prema centralnoj graničnoj teoremi [5] i raspodela slučajne promenljive R iz izraza (4.3.3.) teži normalnoj raspodeli sa parametrima μ i σ/\sqrt{N} kada N teži beskonačnosti. Pouzdanosti α , da će se vrednost R naći u intervalu $\mu \pm \varepsilon$, se prema [1] dobija iz izraza:

$$\alpha = P(\mu - \varepsilon \leq R \leq \mu + \varepsilon) = F\left(\frac{\varepsilon}{\sigma} \sqrt{N}\right). \quad (4.3.4.)$$

$$\alpha = F\left(\frac{\varepsilon}{\sigma} \sqrt{N}\right) \text{ je vrednost Laplasove funkcije za } t = \frac{\varepsilon}{\sigma} \sqrt{N}.$$

U tabeli 4.3.1. su prema [9] date vrednosti t za nekoliko karakterističnih vrednosti α .

Tabela 4.3.1. Vrednosti promenljive t za karakteristične vrednosti α Laplasove funkcije.

α	0.8	0.85	0.9	0.95	0.995	0.999	0.9995	0.9999
t	1.282	1.44	1.645	1.96	2.807	3.291	3.48	3.885

Ako je dato α , vrednost ε , koja određuje interval pouzdanosti u kome se nalazi vrednost R , se dobija iz izraza:

$$\varepsilon = \frac{t\sigma}{\sqrt{N}}. \quad (4.3.5.)$$

Takođe, potreban broj uzročnih događaja N za utvrđivanje vrednosti R sa greškom ne većom od ε , pri pouzdanosti α , se nalazi iz sledećeg izraza:

$$N = \frac{t^2 \sigma^2}{\varepsilon^2}. \quad (4.3.6.)$$

Za sve ovo je potrebno poznavanje standardnog odstupanja σ osnovnog skupa. Kada nije poznato, a radi se o uzorku od većeg broja članova, može se aproksimirati standardnim odstupanjem uzorka.

Na isti način se može utvrditi potreban broj uzročnih događaja kada uzorak pripada skupu sa logaritamskom normalnom raspodelom. Članovi uzorka su: $\log R_1, \log R_2, \dots, \log R_N$ i standardno odstupanje se utvrđuje na osnovu njih.

Kada uzorak (R_1, R_2, \dots, R_N) pripada osnovnom skupu sa binomnom raspodelom (članovi uzorka R_i imaju vrednost 1 ili 0), rizik preskoka je jednak:

$$R = \frac{m}{N}. \quad (4.3.7.)$$

Ovde su:

m - broj uzročnih događaja koji dovode do preskoka,
 N - broj primenjenih uzročnih događaja u uzorku.

Izraz (4.3.7.) predstavlja srednju vrednost binomne raspodele.

Kod uzoraka sa velikim brojem članova binomna raspodela je bliska normalnoj i može se smatrati da će raspodela veličine R biti normalna sa srednjom vrednošću p i standardnim odstupanjem

$$\sqrt{\frac{R(1-R)}{N}}.$$

Pouzdanost α , da će se vrednost p naći u intervalu $R \pm \varepsilon$, se prema [9] nalazi iz izraza:

$$\alpha = P(R - \varepsilon \leq p \leq R + \varepsilon) = F\left(\frac{\varepsilon\sqrt{N}}{\sqrt{R(1-R)}}\right). \quad (4.3.8.)$$

$$\alpha = F\left(\frac{\varepsilon\sqrt{N}}{\sqrt{R(1-R)}}\right) \text{ je vrednost Laplasove funkcije za } t = \frac{\varepsilon\sqrt{N}}{\sqrt{R(1-R)}}.$$

Ako je dato α , vrednost ε se dobija iz izraza:

$$\varepsilon = t\sqrt{\frac{1}{N}R(1-R)}, \quad (4.3.9.)$$

a potreban broj uzročnih događaja N za utvrđivanje vrednosti R sa greškom ne većom od ε , pri pouzdanosti α , se nalazi iz izraza:

$$N = \frac{t^2}{\varepsilon^2} R(1-R). \quad (4.3.10)$$

Kada uzrok (R_1, R_2, \dots, R_N) pripada osnovnom skupu sa eksponencijalnom raspodelom:

$$p(R) = \lambda e^{-\lambda R}, \quad (4.3.11.)$$

parametar $R'_0 = \frac{1}{\lambda}$ se nalazi iz izraza:

$$R'_0 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N R_i. \quad (4.3.12)$$

Interval pouzdanosti, odnosno granice intervala pouzdanosti u kome se nalazi parametar R_0 osnovnog skupa, se nalazi, prema [9], iz izraza:

$$P(r_3 R'_0 \leq R_0 \leq r_1 R'_0) = 2\alpha - 1 = \beta . \quad (4.3.13.)$$

Ovde su:

α - pouzdanost,

r_1, r_3 - koeficijenti koji zavise od broja uzročnih događaja i pouzdanosti α i daju se obično u tabelama [9].

Potreban broj uzročnih događaja N za koji greška određivanja R_0 ne prelazi $\delta R'_0$ (δ - zadata relativna greška), se nalazi u tabeli [9] za pouzdanost $\alpha = \frac{\beta+1}{2}$ i koeficijent $r_1 = 1 + \delta$. U tabeli 4.3.2. su date vrednosti parametra r_1 i r_3 za pojedine vrednosti α i N .

Tabela 4.3.2. Koeficijenti za određivanje granica pouzdanosti

N	α					
	0.999	0.99	0.975	0.95	0.9	0.8
	Koeficijent r_1					
10	3.38	2.42	2.08	1.83	1.61	1.37
50	1.61	1.43	1.35	1.28	1.21	1.14
100	1.40	1.28	1.23	1.19	1.14	1.09
500	1.16	1.11	1.09	1.08	1.06	1.04
1000	1.11	1.08	1.06	1.05	1.04	1.03
	Koeficijent r_3					
10	0.44	0.53	0.58	0.64	0.7	0.8
50	0.67	0.74	0.77	0.80	0.84	0.89
100	0.75	0.80	0.83	0.86	0.88	0.92
500	0.88	0.90	0.92	0.93	0.94	0.96
1000	0.91	0.93	0.94	0.95	0.96	0.97

Teško je proceniti pripadnost uzorka (R_1, R_2, \dots, R_N) nekom od skupova sa poznatim zakonima raspodele, pa time i pouzdanost ustanovljenog rizika preskoka R dobijenog iz uzorka, kada je malo slaganje empirijske raspodele uzorka i pretpostavljene teorijske. Da bi se ipak ustanovilo da li su uzorci dobijeni primenom uzročnih događaja reprezentativni, vrši se na određenim karakterističnim primerima posmatranje promene rizika preskoka u toku primene velikog broja uzročnih događaja. Posle svake primene uzročnog događaja rizik se računa iz izraza:

$$R_{sr,i} = \frac{1}{i} \sum_{i=1}^i R_i . \quad (4.3.14.)$$

Kada posle " i " uzročnih događaja odstupanja rizika $R_{sr,i}$ u odnosu na srednju vrednost rizika R , ustanovljenu posle velikog broja uzročnih događaja, postanu manja od unapred utvrđenog, može se smatrati da je za dobijanje reprezentativnog uzorka dovoljno " i " uzročnih događaja.

5. Parametri pouzdanosti

Rizik preskoka je osnovni računski parametar pouzdanosti rada pojedinih objekata i sistema u celini pri delovanju prenapona. Međutim, nije dovoljan za ocenu pouzdanosti, jer sama vrednost rizika nije dovoljan osnov za utvrđivanje broja očekivanih otkaza i prekida kontinuiteta rada objekata i sistema u posmatranom intervalu vremena. To je i logično, jer je rizik preskoka (proboja) proizvod samo dva slučajna faktora: nastajanja prenapona i nastajanja preskoka nezavisno od vremena; ovde, dakle, nije obuhvaćen treći značajan faktor - broj nastajanja uzročnih događaja u određenom vremenskom intervalu, obično tokom jedne godine.

Kada se u toku godine pojavi N istovrsnih uzročnih događaja (N - broj udara groma u nekoj konfiguraciji, N - broj sklopnih operacija u nekoj konfiguraciji i sl.) dolazi N puta do pojave prenapona na jediničnoj ili složenoj izolaciji razmatrane konfiguracije. Godišnji broj preskoka (N_p) na izolaciji, kada je rizik preskoka R poznat, iznosi:

$$N_p = NR \quad (5.1)$$

Preskok na spoljašnjoj izolaciji normalno ne uzrokuje oštećenja, te se izolacija, nakon preskoka i gašenja luka, samostalno obnavlja, pa je i dalje bez intervencije sposobna za rad.

Intervencijom APU samo deo preskoka uzrokuje ispad objekta. Očekivani godišnji broj ispada (N_i) je:

$$N_i = (1 - P_{APU}) N_p \quad (5.2)$$

U ovom broju ispada nalazi se i očekivani godišnji broj ispada sa oštećenjem izolacije (N_{ot}):

$$N_{ot} = P_{ot} \cdot N_i \quad (5.3)$$

Koeficijent uspešnosti intervencije APU P_{APU} u zavisnosti od naponskog nivoa u mreži EPS kreće se prosečno od 0.7 do 1. Koeficijent oštećenja izolacije P_{ot} je relativno mali; iako o njemu ima malo statističkih podataka, može se proceniti da se za mrežu EPS nalazi ispod 0.1.

Prosečni intervali vremena između dva uzastopna preskoka (T_p), odnosno, između dva uzastopna ispada (T_i) i prekida kontinuiteta rada objekata visokog napona, kao i između dva uzastopna otkaza-oštećenja (T_{ot}), predstavljaju prosečna vremena trajanja rada bez preskoka, bez ispada i bez oštećenja iznose:

$$T_p = \frac{1}{NR} \quad (5.4)$$

$$T_i = \frac{1}{(1 - P_{APU})NR} \quad (5.5)$$

$$T_{ot} = \frac{1}{(1 - P_{APU})P_{ot}NR} \quad (5.6)$$

U slučaju unutrašnje izolacije, proboj predstavlja oštećenje, pa su godišnji broj proboja i prosečno vreme između dva uzastopna proboja dati izrazima (5.1) i (5.4).

Ovih šest parametra N_p , N_i , N_{ot} , T_p , T_i i T_{ot} , zajedno sa rizikom preskoka R , predstavljaju ključne parametre pouzdanosti rada objekata visokog napona; njihovim utvrđivanjem utvrđuje se i pouzdanost rada delova sistema i sistema kao celine. Ako u sistemu ima r paralelno vezanih objekata čiji su rizici utvrđeni pri delovanju istovrsnih uzročnih događaja samo u okviru istog objekta (kada istovrsni uzročni događaji deluju istovremeno na više objekata rizik se utvrđuje za njihovu objedinjenu izolaciju-oni tada predstavljaju jedan objekat), parametri pouzdanosti sistema su:

$$N_{s,p} = \sum_{j=1}^{j=r} N_j R_j \quad (5.7)$$

$$N_{s,i} = \sum_{j=1}^r (1 - P_{APU,j}) N_j R_j, \quad (5.8.)$$

$$N_{s,ot} = \sum_{j=1}^r (1 - P_{APU,j}) P_{ot,j} N_j R_j, \quad (5.9.)$$

$$T_{s,p} = \frac{1}{N_{s,p}}, \quad (5.10.)$$

$$T_{s,i} = \frac{1}{N_{s,i}}, \quad (5.11.)$$

$$T_{s,ot} = \frac{1}{N_{s,ot}}. \quad (5.12.)$$

Kada u sistemu sa r objekata deluje q grupa istovrsnih događaja i poznati su rizici preskoka (proboja) izolacije pri dejstvu svake grupe istovrsnih događaja, parametri pouzdanosti sistema su:

$$N_{s,p,q} = \sum_{j=1}^r \sum_{i=1}^q N_{j,i} R_{j,i}, \quad (5.13.)$$

$$N_{s,i,q} = \sum_{j=1}^r \sum_{i=1}^q (1 - P_{APU,j,i}) N_{j,i} R_{j,i}, \quad (5.14.)$$

$$N_{s,ot,q} = \sum_{j=1}^r \sum_{i=1}^q (1 - P_{APU,j,i}) P_{ot,j,i} N_{j,i} R_{j,i}, \quad (5.15.)$$

$$T_{s,p,q} = \frac{1}{N_{s,p,q}}, \quad (5.16.)$$

$$T_{s,i,q} = \frac{1}{N_{s,i,q}}, \quad (5.17.)$$

$$T_{s,ot,q} = \frac{1}{N_{s,ot,q}}. \quad (5.18.)$$

Nova postrojenja se projektuju ili dotrajala rekonstruišu polazeći od pouzdanosti, odnosno, parametara pouzdanosti koje ova treba da imaju. Postoji niz faktora koji utiču na potrebnu pouzdanost, odnosno na izbor dozvoljenih vrednosti parametara pouzdanosti.

Među njima treba imati u vidu:

- naponski nivo objekta,
- vek objekta,
- cenu objekta i njegovih ključnih elemenata,
- karakter izolacije elemenata objekta,
- veličinu konzuma koji se napaja posredstvom posmatranog objekta,
- značaj konzuma koji se napaja posredstvom objekta,
- mogućnost višestranog napajanja konzuma koji se napaja preko posmatranog objekta,
- specifičnost konzuma-neprekidnost napajanja, štete nastale prekidom tehnološkog procesa (čeličane, elektroliza bakra i aluminijuma, tekstilna industrija i sl.),
- društveni značaj konzuma (bolnice, vojni objekti i sl.),
- obim štete usled prekida u napajanju konzuma,
- mogućnost alternativnog korišćenja drugih objekata u slučaju ispada posmatranog objekta i sl.

Investitor i projektant razmatraju ove faktore pa se, koristeći i dosadašnju praksu, određuju za određene parametre pouzdanosti. Radi orijentacije se navodi: naponski nivo, vek i cena elemenata objekta, kao i osetljivost prirode njihove izolacije, koji iziskuju parametre veće pouzdanosti: na isti način utiču veličina, značaj i specifičnost konzuma koje objekat napaja, kao i gubici usled prekida napajanja i troškovi otklanjanja kvara.

Dalje, iz ranije svetske prakse se navodi:

- za spoljašnju izolaciju nadzemnih vodova dozvoljava se 1 preskok usled sklopnih prenapona tokom 5 godina rada (za napone ≥ 300 kV),
- za spoljašnju izolaciju postrojenja visokih napona na otvorenom i zatvorenom, dozvoljava se 1 preskok usled prenapona tokom 10 godina,
- za unutrašnju izolaciju transformatora visokih napona dozvoljava se 1 kvar usled atmosferskih i sklopnih prenapona tokom 600 godina.

U radnim materijalima TC 28(Sec)95 se navodi da je za opremu prihvatljiv godišnji broj kvarova usled prenapona od 0.001 do 0.004, što zavisi od vremena i cene otklanjanja kvarova; za nadzemne vodove prihvatljiv godišnji broj kvarova usled atmosferskih prenapona na 100 km voda je od 0.1 do 20 (veće vrednosti se odnose na distributivne vodove); za sklopne prenapone prihvatljiv broj kvarova po jednoj operaciji je od 0.001 do 0.01.

Pri izboru vrednosti parametara pouzdanosti objekta treba se oslanjati i na sledeće razmatranje.

Za neprekidan rad objekta visokog napona od presudnog značaja su intervali vremena između dva uzastopna oštećenja njegovih elemenata (izolacionih konstrukcija) i grupa elemenata, ili preskoka na njihovim izolacijama uslovljenih prenaponima, koji mogu dovesti do ispada objekta sa ili bez oštećenja. Vreme trajanja do oštećenja posmatranog elementa ili grupe elemenata je slučajna veličina koja sledi eksponencijalnu raspodelu gustine:

$$p(t) = \frac{1}{T_{ot}} e^{-\frac{t}{T_{ot}}} \quad (5.19)$$

(t - vreme trajanja do oštećenja u godinama,

T_{ot} - srednja vrednost intervala vremena između dva uzastopna oštećenja).

Integralna funkcija ove raspodele određuje kumulativnu verovatnoću nastajanja vremena do oštećenja, odnosno, rizik oštećenja:

$$R(t) = 1 - e^{-\frac{t}{T_{ot}}} \quad (5.20)$$

Pouzdanost rada $Q(t)$ - verovatnoću rada bez oštećenja, određuje:

$$Q(t) = 1 - R(t) = e^{-\frac{t}{T_{ot}}} \quad (5.21)$$

Iz ovog izraza se, za srednju (prosečnu) vrednost intervala vremena između dva uzastopna oštećenja i godišnji broj oštećenja elemenata (N_{ot}) ili grupe elemenata, tokom posmatranog perioda t_v , dobija:

$$T_{ot} = -\frac{t_v}{\ln \alpha} \quad (5.22)$$

$$N_{ot} = -\frac{\ln \alpha}{t_v} \quad (5.23)$$

$\alpha = Q(t_v)$ - pouzdanost rada u posmatranom periodu t_v .

Kada je količnik t_v/T_{ot} mali, onda se T_{ot} i N_{ot} mogu približno dobiti iz sledećih izraza:

$$T_{ot} \approx \frac{t_v}{R}, \quad (5.24.)$$

$$N_{ot} \approx \frac{R}{t_v}. \quad (5.25)$$

Za dalje globalno razmatranje izbora parametara pouzdanosti objekta racionalno je da se izolacione konstrukcije razvrstaju u:

- a) grupu vrlo skupih, složenih i najznačajnijih konstrukcija sa unutrašnjom izolacijom (energetski transformator);
- b) grupu jeftinijih i jednostavnijih, lakše zamenljivih konstrukcija sa unutrašnjom izolacijom (memi transformatori, prekidači, kondenzatori i sl.);
- c) grupu izolacionih konstrukcija sa spoljašnjom, obično samoobnovljivom izolacijom u postrojenju (izolatorski lanci, potporni izolatori, aparatni izolatori i sl.); i
- d) grupu izolacionih konstrukcija sa spoljašnjom samoobnovljivom izolacijom na nadzemnim vodovima (izolatorski lanci i sl.).

Za grupu "a" - odnosno energetske transformatore, pri razmatranju pouzdanosti njihovog rada, polazi se od vrlo visoke pouzdanosti; smatra se da je zadovoljavajuća pouzdanost od $\alpha=95\%$. Sa ovom pouzdanošću se očekuje da tokom određenog perioda, obično tokom celog životnog veka transformatora t_v , neće doći do otkaza, odnosno, oštećenja transformatora. Za vek transformatora $t_v=30$ god. i $\alpha=0.95$ prosečni interval vremena između dva uzastopna oštećenja i očekivani godišnji broj oštećenja iznose:

$$T_{ot} = -\frac{30}{\ln 0.95} = 584.9 \text{ god.}$$

$$N_{ot} = 1.7 \cdot 10^{-3} \text{ oštećenja/god.}$$

Dielektrična čvrstoća unutrašnje izolacije, prvenstveno izolacije namotaja transformatora, ne zadržava trajno svoje osobine. Tokom vremena dolazi do njene postepene degradacije, odnosno do pada probojnih napona. Time se, takođe, tokom vremena pri delovanju prenapona menja rizik proboja izolacije i očekivani godišnji broj oštećenja, odnosno prosečni interval vremena između dva uzastopna oštećenja. Pod pretpostavkom da je poznat stepen degradacije izolacije namotaja transformatora u njegovom životnom veku, broj oštećenja u toku vremena može se odrediti na sledeći način.

Prvo se pretpostavlja funkcija degradacije izolacije namotaja transformatora tokom vremena, odnosno funkcija pada 50% probojnih napona izolacije. Zatim se iz te funkcije za izabrani period (najčešće jedna godina) u životnom veku transformatora utvrđuje 50% probojni napon kao srednja vrednost 50% probojnih napona na početku i na kraju izabranog perioda. Time je određena i kriva efekta izolacije za taj period, jer se pretpostavlja da je $\sigma=0.05u_{50}$ za atmosferske prenapone i $\sigma=0.08u_{50}$ za sklopne prenapone.

Na osnovu ustanovljenih prenapona na izolaciji namotaja transformatora pri dejstvu uzročnih događaja i krive efekta izolacije, utvrđuje se rizik proboja za svaku godinu životnog veka, a iz izraza (5.4.) prosečni intervali vremena između dva uzastopna proboja ($T_{ot,g}$; $g=1,2, \dots, t_v$), kao da transformator sa takvom izolacijom provede čitav vek. Pouzdanost α_g da neće doći do proboja izolacije namotaja transformatora u životnom veku t_v sa prosečnim intervalom vremena između dva uzastopna proboja $T_{ot,g}$, dobija se iz izraza:

$$\alpha_g = e^{-\frac{t_v}{T_{ot,g}}}. \quad (5.26.)$$

Procena broja procentualnih oštećenja transformatora u toku posmatrane godine se dobija iz izraza:

$$n_{ot,g} = \frac{1 - \alpha_g}{t_v} 100[\%]. \quad (5.27.)$$

Ukupan procentualni broj oštećenja u toku životnog veka (t_v) transformatora je:

$$n_{ot} = \sum_{g=1}^{t_v} \frac{1 - \alpha_g}{t_v} 100[\%]. \quad (5.28.)$$

Dozvoljeni procentualni broj oštećenja u toku životnog veka transformatora ne bi trebalo da bude veći od 5%, odnosno prosečan interval vremena između dva uzastopna oštećenja ne bi trebalo da bude manji od 600 godina.

Za grupu "b" - merni transformatori i sl., uz pouzdanost $\alpha=0.85$ i vek $t_v = 30$ god., parametri pouzdanosti su:

$$T_{ot} = 184.6 \text{ god.}$$

$$N_{ot} = 5.4 \cdot 10^{-3} \text{ oštećenja/god.}$$

Izolacione konstrukcije "c" i "d" su konstrukcije sa spoljašnjom samoobnovljivom izolacijom: do njenog oštećenja može doći usled proboja ili usled termičkog delovanja energetskog električnog luka koji prati svaki preskok.

Za postrojenja prosečni interval vremena između dva uzastopna oštećenja i očekivani godišnji broj oštećenja tokom veka od $t_v = 30$ god., uz pouzdanost od $\alpha=0.75$, se dobija:

$$T_{ot} = 104.3 \text{ god.}$$

$$N_{ot} = 9.6 \cdot 10^{-3} \text{ oštećenja/god.}$$

Za nadzemne vodove (vek $t_v = 30-40$ god.), u zavisnosti od njihovog značaja u sistemu, parametri pouzdanosti mogu da budu:

$$T_{ot} = 10-20 \text{ god.}$$

$$N_{ot} = 0.05-0.1 \text{ oštećenja/god.}$$

Na osnovu iznetog, ocenjuje se, da se mogu preporučiti vrednosti parametra pouzdanosti za spoljašnju i unutrašnju izolaciju objekata 400 kV, 220 kV i 110 kV elektroenergetskog sistema date u tabeli 5.1.

Tabela 5.1. Preporučljive vrednosti parametara pouzdanosti

IZOLACIONE KONSTRUKCIJE		Broj preskoka godišnje $N_{g,p}$ (preskok/god.)	Broj ispada godišnje $N_{g,is}$ (ispad/god.)	Broj oštećenja godišnje $N_{g,ot}$ (oštećenje/god)	Prosečni interval vremena između dva uzastopna preskoka T_p (god.)	Prosečni interval vremena između dva uzastopna ispada T_i (god.)	Prosečni interval vremena između dva uzastopna oštećenja T_{ot} (god.)
400 kV	Energetski <u>generatorski</u> transformatori (jedna jedinica)			$1.25 \cdot 10^{-3}$			800
	Merni transformatori i sl. (jedna jedinica)			$1.67 \cdot 10^{-3}$			600
	Spoljašnja samoobnovljiva izolacija postrojenja (sva izolacija)	$100 \cdot 10^{-3}$	$100 \cdot 10^{-3}$	$10 \cdot 10^{-3}$	10	10	100
	Spoljašnja samoobnovljiva izolacija nadzemnih vodova (sva izolacija)	3.3-6.7	$(330-670)10^{-3}$	$(33-67)10^{-3}$	0.15-0.3	1.5-3.0	15-30
	Energetski <u>generatorski</u> transformatori (jedna jedinica)			$1.25 \cdot 10^{-3}$			800
220 kV	Merni transformatori i sl. (jedna jedinica)			$1.67 \cdot 10^{-3}$			600
	Spoljašnja samoobnovljiva izolacija postrojenja (sva izolacija)	$100 \cdot 10^{-3}$	$100 \cdot 10^{-3}$	$10 \cdot 10^{-3}$	10	10	100
	Spoljašnja samoobnovljiva izolacija nadzemnih vodova (sva izolacija)	4.0-6.7	$(400-670)10^{-3}$	$(40-67)10^{-3}$	0.15-0.25	1.5-2.5	15-25
	Energetski <u>generatorski</u> transformatori (jedna jedinica)			$1.25 \cdot 10^{-3}$			800
110 kV	Merni transformatori i sl. (jedna jedinica)			$2 \cdot 10^{-3}$			500
	Spoljašnja samoobnovljiva izolacija postrojenja (sva izolacija)	$125 \cdot 10^{-3}$	$125 \cdot 10^{-3}$	$12.5 \cdot 10^{-3}$	8	8.0	80
	Spoljašnja samoobnovljiva izolacija nadzemnih vodova (sva izolacija)	5-10	0.5-1.0	$(50-100)10^{-3}$	0.1-0.2	1-2	10-20
	Merni transformatori i sl. (jedna jedinica)			$6.7 \cdot 10^{-3}$			150

6. Zavisnost rizika preskoka od podnosivih napona izolacije

Rizici preskoka izolacije su definisani u delu 4. Njih određuju verovatnoće nastajanja amplituda i oblika prenapona-skupovi prenapona i krive efekta izolacija na koje deluju prenaponi. Funkcije raspodela prenapona sadrže, za proračune, potrebne informacije o prenaponima. Krive efekta izolacija određuju verovatnoće preskoka koje odgovaraju amplitudama prenapona određenog oblika. Ove funkcije imaju tri karakteristična parametra: 50% preskočni napon u_{50} , statistički podnosivi napon (10% podnosivi napon) u_p i standardno odstupanje σ . Kada kriva efekta izolacije sledi normalni zakon, između ovih parametara postoji relacija:

$$u_p = u_{10} = u_{50} - 1.282\sigma . \quad (6.1)$$

Tako se za rizik jedne izolacije, na koju deluju samo jedan poznati skup prenapona izražen gustinom raspodele $p(u)$, može napisati:

$$R = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \int_0^{+\infty} p(u) e^{-\frac{(u-u_p-1.282\sigma)^2}{2\sigma^2}} du. \quad (6.2)$$

Kada se sistem sastoji od n paralelnih jediničnih izolacija i na iste deluju različiti skupovi prenapona nastali dejstvom r -te grupe istovrsnih uzročnih događaja, rizik sistema se približno može proceniti iz izraza:

$$R_r \approx 1 - \prod_{j=1}^n \left[1 - \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{j,r}} \int_0^{+\infty} p_{j,r}(u) e^{-\frac{(u-u_{p,j,r}-1.282\sigma_{j,r})^2}{2\sigma_{j,r}^2}} du \right], \quad (6.3)$$

a kada na sistem n jediničnih izolacija deluju skupovi prenapona (atmosferski ili sklopni) nastali dejstvom q grupa uzročnih događaja ukupni rizik preskoka R je jednak:

$$R = \frac{1}{N_g} \sum_{r=1}^q N_{g,r} R_r . \quad (6.4)$$

Ovde su:

R_r - rizik preskoka pri dejstvu r -te grupe istovrsnih uzročnih događaja definisan izrazom (6.3),

$N_g = \sum_{r=1}^q N_{g,r}$ - godišnji broj uzročnih događaja svih q grupa,

$N_{g,r}$ - godišnji broj istovrsnih uzročnih događaja r -te grupe.

Rizik definisan izrazom (6.4) može se koristiti kao osnovni računski parametar pouzdanosti samo ako za svaku od q grupa uzročnih događaja ostaje isti odnos $N_{g,r}/N_g$ ($r=1,2,\dots,q$). Kao osnovni parametar pouzdanosti može se smatrati rizik uslovljen dejstvom jedne grupe istovrsnih uzročnih događaja.

Skupovi prenapona koji deluju na jedinične izolacije su uglavnom nepoznati i ustanovljavaju se primenom potrebnog broja uzročnih događaja da bi nastali uzorak bio reprezentativan, odnosno dovoljno dobro predstavljao osnovni skup. Rizik preskoka u sistemu sa n jediničnih izolacija, pri dejstvu N_r istovrsnih uzročnih događaja r -te grupe, je:

$$R_r = \frac{1}{N_r} \sum_{i=1}^{N_r} \left\{ 1 - \prod_{j=1}^n \left[1 - \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{j,i}} \int_0^{u_{j,i}} e^{-\frac{(u-u_{p,j,i}-1.282\sigma_{j,i})^2}{2\sigma_{j,i}^2}} du \right] \right\} \quad (6.5)$$

($u_{j,i}$ - prenapon na j -toj izolaciji pri i -tom događaju iz grupe N_r uzročnih događaja),

a pri dejstvu q grupa uzročnih događaja se dobija iz izraza (6.4), samo što se rizik preskoka r -te grupe istovrsnih događaja R_r uzima iz izraza (6.5).

Primenom najuprošćenije predstave krive efekta - jedinične izolacije Hevisajdovom funkcijom $P(u)=h(u-u_p)$ izraz (6.2), postaje:

$$R = \int_{u_p}^{+\infty} p(u) du = 1 - F(u_p), \quad (6.6)$$

izraz (6.3) postaje:

$$R_r \approx 1 - \prod_{j=1}^n [1 - F(u_{p,j,r})], \quad (6.7)$$

i izraz (6.5) postaje:

$$R_r = \frac{1}{N_r} \sum_{i=1}^{N_r} \left\{ 1 - \prod_{j=1}^n [1 - h(u_{j,i} - u_{p,j,i})] \right\} = \frac{N_{r,p}}{N_r} \quad (6.8)$$

Ovde su:

$F(u_p)$ - vrednost raspodele prenapona [integralne funkcije gustine raspodele $p(u)$] jedinične izolacije za $u=u_p$,

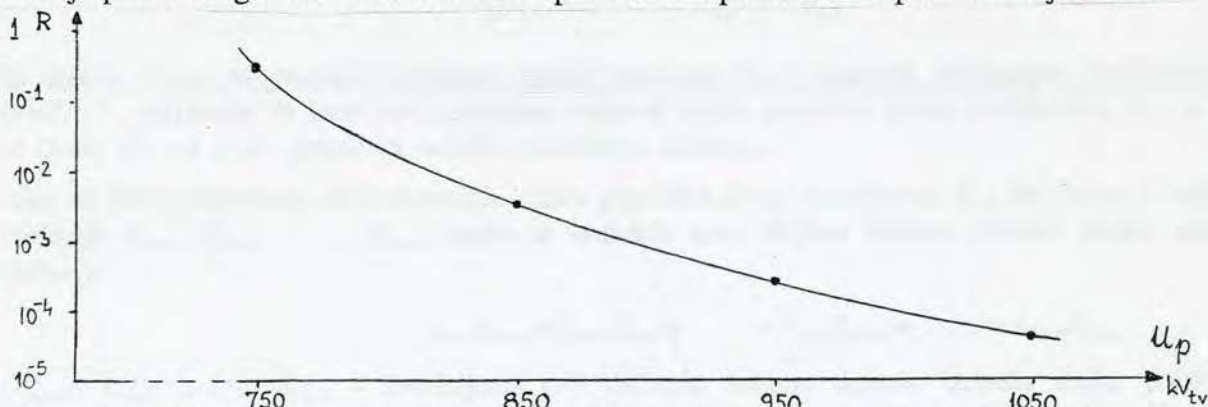
$F(u_{p,j,r})$ - vrednost raspodele prenapona j -te jedinične izolacije $u=u_{p,j,r}$ pri dejstvu prenapona iz r -te grupe uzročnih događaja,

$N_{r,p}$ - broj uzročnih događaja r -te grupe pri kojima se desio preskok na bar jednoj jediničnoj izolaciji u sistemu.

Iz navedenih izraza se vidi da je rizik preskoka funkcija podnosivih napona pojedinih izolacija i skupova prenapona koji deluju na ove izolacije. Ako se skupovi prenapona koji deluju na izolacije zadrže neizmenjenim, rizik je funkcija samo podnosivih napona i to podnosivih napona svih jediničnih izolacija u sistemu. Samo za jednu jediničnu ili za q identičnih jediničnih izolacija, rizik je funkcija jedne promenljive - jednog podnosivog napona, pa se zavisnost rizika od podnosivih napona može prikazati grafički u ravni.

U malom broju uprošćenih slučajeva zavisnost rizika od podnosivih napona moguće je izraziti elementarnim funkcijama. To su uglavnom slučajevi izolacija čije krive efekta slede pomerenu Hevisajdovu funkciju $P(u)=h(u-u_p)$, a funkcije gustine raspodela prenapona eksponencijalni, Vejbulov ili neki drugi jednostavan zakon.

Primeru radi razmatrani su rezultati proračuna rizika preskoka na nadzemnom vodu 400 kV "Beograd 8 - Đerdap" pri njegovom uključenju u neopterećenom stanju prekidačem 400 kV u TS "Beograd 8". Rizici su izračunati za pretpostavljene podnosive sklopne udarne napone od 750 kV do 1050 kV iz izraza (6.5) primenom 200 operacija uključenja prekidača u TS "Beograd 8". Na sl.6.1 je prikazana grafička zavisnost rizika preskoka od podnosivih napona izolacije voda.



Sl. 6.1. Grafička predstava zavisnosti rizika preskoka na nadzemnom vodu 400 kV "Beograd 8 - Đerdap" od podnosivih sklopnih udarnih napona izolacije

7. Dekompozicija ukupnog rizika sistema na rizike podsistema izolacija i sinteza rizika preskoka podsistema izolacija

Izolacija objekta, sačinjena od velikog broja paralelnih uglavnom jediničnih izolacija, kao celina predstavlja vrlo složen sistem izolacija. Preskok i makar na jednoj izolaciji znači prvi korak ka ispadu objektu iz pogona, naročito ako se ona nalazi u njegovom ključnom delu, kao što su sabirnice i sl.

S obzirom da se objekti grade za unapred datu tehničku, a ne apsolutnu pouzdanost i bezbednost u radu, svrsishodno je da se u određenim slučajevima dozvoljeni rizik preskoka celog objekta (sistema izolacije) dekompozicijom rasporedi na pojedine delove (podsisteme izolacije) tako da u većini preskoci nastaju na izolaciji delova koji se mogu lakše eliminisati; time se umanjuje verovatnoća ispada iz pogona celog objekta.

Sa stanovišta značaja i neprekidnosti funkcionisanja objekata i vrednosti pojedinih njegovih elemenata, sistem izolacija se može razložiti u podsisteme izolacija. Ovi podsistemi izolacija se posmatraju u sklopu celine sistema, ali i posebno; za njih se posebno mogu utvrđivati rizici preskoka, godišnji brojevi preskoka i sl. Od praktičnog je značaja što se podsistemima izolacije mogu postavljati posebni uslovi vezani za pouzdanost rada njihove izolacije, ali i celine sistema izolacija objekata.

Dekompozicija ukupnog rizika preskoka predstavlja postupak njegove raspodele na rizike preskoka pojedinih podsistema.

Dekompozicija rizika preskoka objekata (sistema) na podsisteme jediničnih izolacija nije jednoznačno određen problem; iz mnoštva rešenja treba izabrati optimalno. Optimizacija dekompozicije rizika iziskuje:

- definisanje zona objekata tj. podsistema izolacije,
- definisanje uslova dekompozicije rizika, odnosno broja preskoka na podsistemima u cilju ostvarivanja veće pouzdanosti funkcionisanja objekta, veće bezbednosti njegovih ključnih elemenata i sl.

Optimizacija dekompozicije rizika preskoka R_r , pri delovanju r -te grupe istovrsnih uzročnih događaja, na rizike m podsistema $R_{r,1}, R_{r,2}, \dots, R_{r,m}$ se može ostvariti kroz željene odnose između rizika podsistema:

$$\lambda_{r,1}R_{r,1} = \lambda_{r,2}R_{r,2} = \dots = \lambda_{r,k}R_{r,k} = \dots = \lambda_{r,m}R_{r,m} \quad (7.1)$$

($\lambda_{r,1}, \lambda_{r,2}, \dots, \lambda_{r,m}$ - koeficijenti koji definišu željene odnose između rizika m podsistema).

Rizik preskoka R_r je sada približno jednak:

$$R_r \approx 1 - \prod_{k=1}^m (1 - R_{r,k}) = 1 - \prod_{k=1}^m \left(1 - \frac{\lambda_{r,1}}{\lambda_{r,k}} R_{r,1}\right) \quad (7.2)$$

Iz izraza (7.2), za poznatu vrednost rizika preskoka R_r i unapred definisane koeficijente $\lambda_{r,k}$ ($k=1, \dots, m$), može se izračunati približna vrednost rizika preskoka prvog podsistema $R_{r,1}$, a potom iz izraza (7.1) i rizik preskoka ostalih podsistema izolacije.

Ako se želi optimizirati dekompozicija rizika preskoka k -tog podsistema $R_{r,k}$ na rizike n jediničnih izolacija $R_{r,k,1}, R_{r,k,2}, \dots, R_{r,k,n}$, može se ostvariti kroz željene odnose između rizika jediničnih izolacija:

$$\lambda_{r,k,1}R_{r,k,1} = \lambda_{r,k,2}R_{r,k,2} = \dots = \lambda_{r,k,j}R_{r,k,j} = \dots = \lambda_{r,k,n}R_{r,k,n} \quad (7.3)$$

($\lambda_{r,k,1}, \lambda_{r,k,2}, \dots, \lambda_{r,k,n}$ - koeficijenti koji definišu željene odnose između rizika preskoka n jediničnih izolacija k -tog podsistema).

Rizik preskoka k -tog podsistema $R_{r,k}$ je sada približno jednak:

$$R_{r,k} \approx 1 - \prod_{j=1}^n (1 - R_{r,k,j}) = 1 - \prod_{j=1}^n \left(1 - \frac{\lambda_{r,k,1}}{\lambda_{r,k,j}} R_{r,k,1}\right) \quad (7.4)$$

Iz izraza (7.4) za poznatu vrednost rizika preskoka $R_{r,k}$ i unapred definisanih koeficijenata $\lambda_{r,k,j}$ ($j=1, \dots, n$), može se izračunati približna vrednost rizika preskoka prve jedinične izolacije $R_{r,k,1}$, a potom iz izraza (7.3) i rizik preskoka ostalih jediničnih izolacija.

Pod pretpostavkom da k -ti podsistem ima identične jedinične izolacije izraz (7.4) postaje:

$$R_{r,k} \approx 1 - (1 - R_{r,k,1})^n \quad (7.5)$$

i rizik jedinične izolacije je:

$$R_{r,k,1} \approx 1 - (1 - R_{r,k})^{\frac{1}{n}} \quad (7.6)$$

Isti postupak dekompozicije se izvodi za rizike preskoka svake od q grupa uzročnih događaja.

Na osnovu utvrđenih rizika preskoka jediničnih izolacija procenjuju se parametri njihovih krivih efekta. Utvrđivanjem krivih efekta stvorene su mogućnosti tačnog izračunavanja rizika podsistema i objekata iz izraza u delu 4 pri primeni q grupa uzročnih događaja. Ukoliko se sračunatim rizicima iz reprezentativnih uzoraka ne zadovoljavaju polazni uslovi dekompozicije, potrebno je izvršiti odgovarajuću korekciju ponovnim proračunom sa izmenjenim parametrima krivih efekta ili ograničenjima prenapona do zadovoljavajuće saglasnosti. Postizanjem ove saglasnosti završava se postupak dekompozicije rizika preskoka na jedinične izolacije u skladu sa optimalnim uslovima.

Napred navedeni postupak dekompozicije je urađen za rizik preskoka jedne (r -te) grupe istovrsnih uzročnih događaja. Međutim, on najčešće nije poznat. Za razmatrane objekte se ne definiše ukupni rizik preskoka, već ukupni dozvoljeni godišnji broj preskoka ($N_{dg,p}$), ili ispada ($N_{dg,i}$), ili oštećenja ($N_{dg,ot}$), odnosno prosečni intervali vremena između dva uzastopna preskoka ($T_{d,p}$), ili ispada ($T_{d,i}$), ili oštećenja ($T_{d,ot}$).

Ako je definisan dozvoljeni godišnji broj preskoka, do vrednosti rizika preskoka jedne (r -te) grupe istovrsnih uzročnih događaja može se doći na sledeći način.

Ukupni dozvoljeni godišnji broj preskoka predstavlja zbir dozvoljenih godišnjih brojeva preskoka svih q grupa uzročnih događaja:

$$N_{dg,p} = \sum_{r=1}^q N_{dg,p,r} \quad (7.7)$$

Raspodela dozvoljenih godišnjih brojeva preskoka na grupe može, ali ne mora da bude zadata. Iz statističkih podataka o događajima na istim ili sličnim objektima, kao što je razmatrani, dolazi se do podataka o godišnjem broju uzročnih događaja svake od q grupa. Ukupni godišnji broj događaja (N_g) je zbir godišnjih brojeva događaja svake od q grupa:

$$N_g = \sum_{r=1}^q N_{g,r} \quad (7.8)$$

Kada se raspoložuje sa podacima o ukupnom dozvoljenom godišnjem broju preskoka na objektu i ukupnom godišnjem broju događaja, može se definisati i ukupni dozvoljeni rizik preskoka:

$$R \leq \frac{N_{dg,p}}{N_g}, \quad (7.9)$$

iako on nema poseban značaj za objekat.

Rizik preskoka r -te grupe istovrsnih uzročnih događaja se dobija iz izraza:

$$R_r \leq \frac{N_{dg,p,r}}{N_{g,r}}, \quad (7.10)$$

ako je zadat dozvoljeni godišnji broj preskoka r -te grupe ($N_{dg,p,r}$).

Kada on nije zadat, potrebno je uspostaviti željene odnose između dozvoljenih godišnjih brojeva preskoka q grupa uzročnih događaja.

Željeni odnosi se mogu uspostaviti na sledeći način:

$$\lambda_1 N_{dg,p,1} = \lambda_2 N_{dg,p,2} = \dots = \lambda_r N_{dg,p,r} = \dots = \lambda_q N_{dg,p,q}, \quad (7.11.)$$

odnosno:

$$\lambda_1 N_{g,1} R_1 = \lambda_2 N_{g,2} R_2 = \dots = \lambda_r N_{g,r} R_r = \dots = \lambda_q N_{g,q} R_q \quad (7.12.)$$

($\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \dots, \lambda_r, \dots, \lambda_q$ - koeficijenti koji definišu željene odnose između dozvoljenih godišnjih brojeva preskoka q grupa uzročnih događaja).

Rizik preskoka r -te grupe istovrsnih uzročnih događaja se dobija iz sledećeg izraza:

$$R_r = \frac{N_{dg,p}}{\lambda_r N_{g,r} \sum_{r=1}^q \frac{1}{\lambda_r}} \quad (7.13.)$$

Sada se može izvršiti dekompozicija rizika preskoka R_r na rizike preskoka podsistema izolacija, odnosno na rizike preskoka jediničnih izolacija.

Sinteza rizika preskoka pri delovanju r -te grupe istovrsnih uzročnih događaja je postupak utvrđivanja rizika preskoka objekta na bazi datih rizika svih pripadajućih podsistema, odnosno na bazi datih rizika svih jediničnih izolacija svih podsistema. Na osnovu rizika preskoka jediničnih izolacija procene se parametri krivih efekta i usklade sa standardizovanim podnosivim udarnim naponima izolacije. Zbog ovog usklađivanja potrebno je izvršiti proračune rizika preskoka koristeći reprezentativne uzorke prenapona dobijene primenom N istovrsnih uzročnih događaja.

Rizik preskoka objekta, koji se sastoji od m podsistema sa po n_k elementarnih izolacija, pri dejstvu N istovrsnih uzročnih događaja r -te grupe se dobija iz izraza:

$$R_r = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left\{ 1 - \prod_{j=1}^{n_1} [1 - P_{i,j,1}(u_{i,j,1})] \prod_{j=1}^{n_2} [1 - P_{i,j,2}(u_{i,j,2})] \dots \prod_{j=1}^{n_k} [1 - P_{i,j,k}(u_{i,j,k})] \dots \prod_{j=1}^{n_m} [1 - P_{i,j,m}(u_{i,j,m})] \right\} \quad (7.14)$$

$P_{i,j,k}(u_{i,j,k})$ - verovatnoća preskoka j -te jedinične izolacije k -tog podsistema pri pojavi na njoj prenapona $u_{i,j,k}$ pri i -tom uzročnom događaju r -te grupe.

Na isti način se utvrđuju rizici preskoka objekta pri delovanju svake od q grupa uzročnih događaja. Ukupni rizik preskoka izolacije, pri dejstvu q grupa uzročnih događaja, ako je potreban, sintezom rizika se utvrđuje iz izraza:

$$R = \frac{1}{N_g} \sum_{r=1}^q N_r R_r \quad (7.15)$$

(N_g - ukupni godišnji broj događaja od svih q grupa uzročnih događaja,

N_r - godišnji broj događaja r -te grupe istovrsnih uzročnih događaja).

8. Proračun funkcija verovatnoća preskoka (proboja)-krivih efekta izolacije objekata visokih napona

Funkcije verovatnoće preskoka i proboja izolacije (fazne, međufazne, podužne) objekata visokih napona i prenaponski skupovi u njima su osnove koje definišu pouzdanost njihovog rada, odnosno, rizik preskoka ili proboja i prekida kontinuiteta rada s obzirom na prenaponska naprezanja.

Za definisane konfiguracije i tehnologiju rada objekata visokog napona, kao i njihove lokacije na terenu, odnosno njihove grmljavinske zone, sa manjom ili većom tačnošću, mogu se ustanoviti skupovi prenapona koji se javljaju i deluju u njima. Pouzdanost rada ovako definisanih objekata na bazi prenaponskih naprezanja zavisi od preskočnih karakteristika svih njihovih jediničnih izolacija. S obzirom da svakoj vrsti prenapona odgovara posebna kriva efekta svake jedinične izolacije, potpuni proračun krivih efekta svake jedinične izolacije obuhvata utvrđivanje ovih za svaku vrstu prenapona. Od mnoštva oblika i vrsta prenapona, za potrebe definisanja podnošenja prenaponskih naprezanja izolacionih konstrukcija - krivih efekta, podnosivih napona i stupnjeva izolacije, danas se koriste atmosferski, sklopni i privremeni prenaponi.

U praksi provera sposobnosti podnošenja pojedinih vrsta prenapona, vezuje se uglavnom za jedinične izolacije (rastavljači, prekidači, izolatorske potpore i lanci itd.), koje se kao takve ugrađuju u objekte visokog napona i formiraju složenu izolaciju objekata. Stoga se u proračunu, kao cilj prvenstveno postavlja utvrđivanje (proračun) potrebne krive efekta jediničnih izolacija objekta.

Osnov za proračun krive efekta jedinične izolacije je željena pouzdanost rada objekta visokog napona kvantificirana parametrima pouzdanosti rada, i željena raspodela ovih na pojedine jedinične izolacije. Ako se objekat sastoji od n jediničnih izolacija, rizik preskoka na bar jednoj jediničnoj izolaciji je:

$$R \approx 1 - \prod_{j=1}^{j=n} (1 - R_j) . \quad (8.1)$$

Željena raspodela rizika R iz izraza (8.1) na rizike pojedinih jediničnih izolacija može se definisati na sledeći način:

$$\lambda_1 R_1 = \lambda_2 R_2 = \dots = \lambda_j R_j = \dots = \lambda_n R_n . \quad (8.2)$$

Ovde su: R - rizik preskoka na bar jednoj jediničnoj izolaciji objekta,

$R_1, R_2, \dots, R_j, \dots, R_n$ - rizici preskoka na pojedinim jediničnim izolacijama,

$\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_j, \dots, \lambda_n$ - koeficijenti koji definišu odnose između rizika na jediničnim izolacijama.

Sada se rizici pojedinih jediničnih izolacija mogu približno izračunati iz izraza (8.1) i (8.2).

Ako su parametri λ isti (sve jedinične izolacije imaju iste krive efekta), za slučaj objekta sa n jediničnih izolacija, rizik jedne jedinične izolacije približno određuje jednačina:

$$R_1 \approx 1 - (1 - R)^{\frac{1}{n}} . \quad (8.3)$$

Sama kriva efekta $P(u)$ može se odrediti iz izraza:

$$R_1 = \int_0^{\infty} P(u) p(u) du , \quad (8.4)$$

kada su poznati:

R_1 - rizik preskoka jedinične izolacije, i

$p(u)$ - gustina raspodele prenapona.

Dalje, poznat je i oblik krive efekta jedinične izolacije:

$$P(u) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \int_0^u e^{-\frac{(u-u_{50,1})^2}{2\sigma^2}} du , \quad (8.5)$$

odnosno njena približna vrednost:

$$P(u) = h(u-u_{50,1}) \quad (8.6)$$

Standardno odstupanje σ -parametar krive efekta se menja u uskim granicama i zavisi od oblika prenapona; u proračunima se uzima da za spoljašnju izolaciju iznosi:

$$\sigma_a = 0.05u_{50,1} \text{ za atmosferske prenapone, i}$$

$$\sigma_s = 0.08u_{50,1} \text{ za sklopne prenapone.}$$

Tako se za primenu tačne krive efekta ima:

$$R_1 = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \int_0^{+\infty} \int_0^u e^{-\frac{(u-u_{50,1})^2}{2\sigma^2}} du p(u) du. \quad (8.7)$$

Ako je $\sigma = \sigma_a$, iz izraza (8.7) se utvrđuje $u_{50,1}$ -50% preskočni napon jedinične izolacije za atmosferske prenapone, a ako je $\sigma = \sigma_s$ utvrđuje se $u_{50,1}$ za sklopne prenapone.

Primenom za krivu efekta izraza (8.6) dobija se vrlo prosta relacija:

$$R_1 = \int_{u_{50,1}}^{\infty} p(u) du. \quad (8.8)$$

Utvrđivanjem $u_{50,1}$ za date skupove atmosferskih, odnosno sklopnih prenapona iz izraza (8.7) i njegovom zamenom u (8.5), potpuno se definiše kriva efekta jedinične izolacije za date skupove atmosferskih i sklopnih prenapona.

U slučaju da je nepoznata funkcija gustine raspodele prenapona, a da se poznaje samo reprezentativni uzorak prenapona sa N članova dobijen merenjem ili proračunom, rizik preskoka jedinične izolacije je:

$$R_1 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N P(u_i). \quad (8.9)$$

Ovde su:

u_i - napon na jediničnoj izolaciji pri pojavi i -tog uzročnog događaja,

$P(u_i)$ - verovatnoća preskoka pri pojavi prenapona u_i .

Verovatnoće preskoka pri pojavi prenapona u_i se određuju iz pretpostavljene krive efekta jedinične izolacije definisane izrazom (8.5). Ukoliko je vrednost rizika utvrđena iz izraza (8.9) za poznati uzorak prenapona jednaka zadanoj vrednosti rizika preskoka, pretpostavljena kriva efekta je kriva efekta jedinične izolacije. Kada to nije tako, pretpostavlja se nova kriva efekta. Postupak se ponavlja dok utvrđena vrednost rizika iz izraza (8.5) ne postane jednaka zadanoj. Ona pretpostavljena kriva efekta pri kojoj se to postigne predstavlja krivu efekta jedinične izolacije. Ovim se završava proračun definisanja krive efekta.

Statistički podnosivi napon jedinične izolacije je napon 90% podnosivosti, odnosno napon pri kome kriva efekta ima 10% vrednost.

On se može sračunati iz izraza:

$$u_{10} = u_{50,1} - 1.282\sigma. \quad (8.10)$$

Konvencionalni podnosivi napon jedinične izolacije je napon čije primene ne izazivaju preskoke. To je napon koji se nalazi van opsega 3σ i dobija se iz izraza:

$$u_{3\sigma} = u_{50,1} - 3\sigma, \quad (8.11)$$

ili za povećanu pouzdanost

$$u_{4\sigma} = u_{50,1} - 4\sigma. \quad (8.12)$$

Radi usklađivanja sa stupnjem izolacije prema standardu IEC 71-1, iz odgovarajuće tabele treba izabrati prvi viši standardizovani podnosivi napon za atmosferske i sklopne prenapone jedinične izolacije od onih dobijenih izrazom (8.10).

9. Izolacija objekata visokih napona

9.1 Standardizovani podnosivi naponi izolacionih konstrukcija objekata visokih napona

Standardima IEC 71-1/1993 su za određene vrste napona propisani standardni podnosivi naponi za verifikaciju sposobnosti izolacionih konstrukcija da podnose naponska naprezanja. Vrednosti ovih podnosivih napona date su u tabeli 9.1.1. za najviše napone opreme $U_m = 1 \div 245 \text{ kV}$ zaključno (područje I), a u tabeli 9.1.2., za najviše napone opreme $U_m > 245 \text{ kV}$ (područje II).

Tabele se odnose na sve vrste napona (naizmjenični, sklopni i atmosferski udarni naponi) i sve izolacije (fazna, međufazna i longitudinalna). U ovom smislu tabele se dalje preciziraju sledećim dopunama:

- Za međufaznu izolaciju (izolacija faza-faza) naponskog područja I, standardni međufazni podnosivi kratkotrajni napon industrijske frekvencije i međufazni podnosivi atmosferski udarni napon, jednaki su odgovarajućim faznim podnosivim naponima (tabela 9.1.1.). Vrednosti u zgradama mogu biti nedovoljne da dokažu da su zahtevani podnosivi naponi zadovoljeni, te se mogu tražiti dopunska ispitivanja međufaznim podnosivim naponima.
- Za međufaznu izolaciju, naponskog područja II, standardni međufazni podnosivi atmosferski udarni napon je jednak odgovarajućem faznom atmosferskom udarnom naponu (tabela 9.1.2.).
- Za podužnu izolaciju, naponskog područja I, standardni kratkotrajni podnosivi napon industrijske učestanosti i podnosivi atmosferski udarni napon jednaki su odgovarajućim faznim podnosivim naponima (tabela 9.1.1.).
- Za podužnu izolaciju, naponskog područja II, standardna sklopna udarna komponenta kombinovanog podnosivog napona je data u tabeli 9.1.2., dok je temena vrednost komponente napona industrijske učestanosti suprotnog polariteta i iznosi $U_m \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}}$; standardna komponenta atmosferskog udarnog napona je jednaka odgovarajućem faznom podnosivom naponu (tabela 9.1.2.), dok je temena vrednost komponente napona industrijske učestanosti suprotnog polariteta i iznosi $0.7U_m \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}}$.

9.2. Konverzija podnosivih napona

U objektima svih nazivnih napona mogu se javljati i delovati prenaponi svih vrsta - privremeni, sklopni i atmosferski, prema kojima se danas vrši izbor izolacije; za ove prenapone su standardizovani odgovarajući reprezentativni naponi radi utvrđivanja ispitivanjem podnosivih ili preskočnih napona pojedinih izolacionih konstrukcija. Kako je međutim, sposobnost podnošenja napona izolacija standardima određena spregom od dva podnosiva napona:

- podnosivim kratkotrajnim naponom industrijske frekvencije i podnosivim atmosferskim udarnim naponom (oblast napona $\leq 245 \text{ kV}$), i
- podnosivim sklopnim udarnim naponom i podnosivim atmosferskim udarnim naponom (oblast napona $> 245 \text{ kV}$),

očigledna je potreba konverzije podnosivih napona jedne vrste u podnosive napone druge vrste. Ove konverzije se vrše množenjem vrednosti podnosivih napona koji se konvertuju odgovarajućim faktorima konverzije, koji su, u skladu sa IEC 71-2, 28/115/FDIS iz 1996.god., dati u tabelama 9.2.1 i 9.2.2.

Tabela 9.1.1. Standardni nivoi (stupnjevi) izolacije za naponsko područje I
($1 \text{ kV} < U_m \leq 245 \text{ kV}$)

Najviši napon opreme U_m kV (ef. vrednost)	Standardni podnosivi kratkotrajni napon industrijske frekvencije kV (ef. vrednost)	Standardni podnosivi atmosferski udarni napon kV (temena vrednost)
3.6	10	20
		40
7.2	20	40
		60
12	28	60
		75
		95
17.5	38	75
		95
24	50	95
		125
		145
36	70	145
		170
52	95	250
72.5	140	325
123	(185)	450
	230	550
145	(185)	(450)
	230	550
	275	650
170	(230)	(550)
	275	650
	325	750
245	(275)	(650)
	(325)	(750)
	360	850
	395	950
	460	1050

NAPOMENA - Ako se vrednosti u zagradama smatraju nedovoljnim da dokažu da su zadovoljeni zahtevani podnosivi međufazni naponi, zahtevaju se dopunska ispitivanja podnosivosti međufazne izolacije.

Tabela 9.1.2. - Standardni nivoi (stupnjevi) izolacije za naponsko područje II
($U_m > 245$ kV)

Najviši napon opreme U_m kV (ef. vrednost)	Standardni podnosivi sklopni udarni napon			Standardni podnosivi atmosferski udarni napon kV (temena vrednost)
	Podužna izolacija (napomena 1) kV (temena vrednost)	Fazna izolacija kV (temena vrednost)	Međufazna izolacija (odnos prema temenoj vrednosti fazne izolacije)	
300	750	750	1.50	850 950
	750	850	1.50	950 1050
362	850	850	1.50	950 1050
	850	950	1.50	1050 1175
420	850	850	1.60	1050 1175
	950	950	1.50	1175 1300
	950	1050	1.50	1300 1425
525	950	950	1.70	1175 1300
	950	1050	1.60	1300 1425
	950	1175	1.50	1425 1550
765	1175	1300	1.70	1675 1800
	1175	1425	1.70	1800 1950
	1175	1550	1.60	1950 2100

NAPOMENE

1. Vrednost udarne komponente odgovarajućih kombinovanih ispitivanja
2. Uvedeni su naponi 550 kV (umesto 525 kV), 800 kV (umesto 765 kV), 1200 kV; vrednosti između 765 kV i 1200 kV i standardni podnosivi naponi, vezani za njih, su još u razmatranju.

Tabela 9.2.1. Faktori konverzije ispitivanja (oblast napona ≤ 245 kV) za konverziju zahtevanih (potrebnih) podnosivih sklopnih udarnih napona u kratkotrajne podnosive napone industrijske učestanosti, kao i u podnosive atmosferske udarne napone

Izolacija	K_t za kratkotrajni podnosivi napon industrijske učestanosti	K_t za atmosferski podnosivi udarni napon
Spoljašnja izolacija		
- vazдушna rastojanja i čisti izolatori, suvi:		
- fazna	$0.6 + U_{rw,sw}/8500$	$1.05 + U_{rw,sw}/6000$
- međufazna	$0.6 + U_{rw,sw}/12700$	$1.05 + U_{rw,sw}/9000$
- čisti izolatori, vlažni	0.6	1.3
Unutrašnja izolacija		
- gasom izolovana postrojenja	0.7	1.25
- izolacija uronjena u tečnoj izolaciji	0.5	1.10
- čvrsta izolacija	0.5	1.00
$U_{rw,sw}$ - zahtevani podnosivi sklopni udarni napon u kV. Faktor konverzije uključuje i faktor $\frac{1}{\sqrt{2}}$ kojim se konvertuje temena u efektivnu vrednost.		

Tabela 9.2.2. Faktori konverzije ispitivanja za konverziju zahtevanih kratkotrajnih podnosivih napona industrijske učestanosti u podnosive sklopne udarne napone (oblast napona > 245 kV)

Izolacija	K_t za podnosive sklopne udarne napone
Spoljašnja izolacija	
- vazдушna rastojanja i čisti suvi izolatori	1.4
- čisti izolatori, vlažni	1.7
Unutrašnja izolacija	
- gasom izolovana postrojenja	1.6
- izolacija uronjena u tečnoj izolaciji	2.3
- čvrsta izolacija	2.0
Faktor konverzije uključuje i faktor $\sqrt{2}$ kojim se konvertuje efektivna u temenu vrednost.	

9.3. Proračun preskočnih napona vazdušnih rastojanja na bazi eksperimentalnih podataka

Na bazi eksperimentalnih podataka, IEC 71-2, 28/115/FDIS iz 1996.god. utvrdio je približne izraze za sračunavanje 50% preskočnih napona vazdušnih rastojanja - vazdušnih iskrišta nekih konfiguracija (struktura) elektroda.

9.3.1. Preskočni naizmenični naponi

Za konfiguracije iskrišta šiljak - ravan čija preskočna rastojanja d nisu veća od 3 m, 50% preskočni napon industrijske učestanosti U_{50RP} se može sračunati pomoću jednačine:

$$U_{50RP} = 750\sqrt{2} \ln(1 + 0.55d^{1.2}) . \quad (9.3.1.1.)$$

(U_{50RP} u kV_{LV} , d u m).

Uticao konfiguracije elektroda iskrišta na preskočni napon je manji za naizmenične napone nego za sklopne.

Za iskrišta drugih konfiguracija čija su preskočna rastojanja d veća od 2 m, 50% preskočni napon treba sračunavati iz jednačine:

$$U_{50} = U_{50RP} (1.35 K - 0.35 K^2) . \quad (9.3.1.2.)$$

K je faktor konfiguracije iskrišta dat u tabeli 9.3.1.1.

9.3.2. Preskočni spori prenaponi

Promenu eksperimentalnih vrednosti 50% preskočnih sporih napona pozitivnog polariteta i kritičnog trajanja čela u funkciji preskočnog rastojanja d do 25 m, za iskrišta konfiguracije šiljak-ploča, prihvatljivo opisuje jednačina:

$$U_{50RP} = 1080 \ln(0.46d + 1) . \quad (9.3.2.1.)$$

Za standardne sklopne udarne napone, 50% preskočne napone daje jednačina:

$$U_{50RP} = 500 d^{0.6} . \quad (9.3.2.2.)$$

Kod drugih konfiguracija iskrišta, 50% preskočni naponi za standardne sklopne udarne napone, se sračunavaju pomoću jednačine:

$$U_{50} = K \cdot U_{50RP} \quad (9.3.2.3.)$$

(U_{50} i U_{50RP} su u kV_{n} , d u m ; K je dato u tabeli 9.3.1.1.).

9.3.3. Preskočni brzi prenaponi

U konfiguraciji šiljak-ploča, čija su preskočna rastojanja d 1 ÷ 10 m, 50% preskočni naponi standardnog oblika pozitivnog polariteta se mogu sračunati iz jednačine:

$$U_{50RP} = 530d \quad (9.3.3.1.)$$

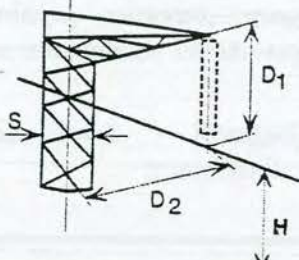
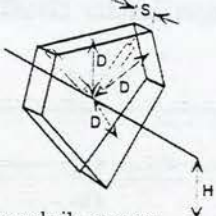
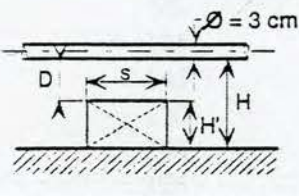
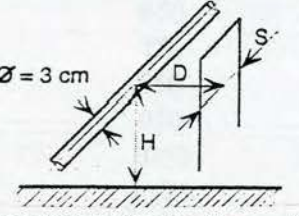
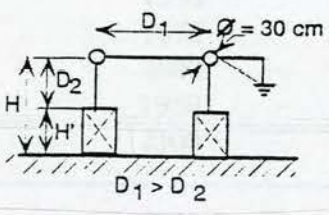
Kod nadzemnih vodova 50% preskočne udarne napone negativnog polariteta daje jednačina:

$$U_{50} = 700d . \quad (9.3.3.2.)$$

(U_{50RP} i U_{50} su u kV_{n} , d u m).

Svi proračuni preskočnih napona odnose se na nadmorsku visinu $H=0$, normalne pritiske i temperature okoline.

Tabela 9.3.1.1. Tipični faktori vazdušnog faznog iskrišta K za 50% preskočne sklopne udarne napone.

Tip iskrišta	Parametri	Tipičan opseg	Referentna vrednost
 Provodnik-konzola	K	1.36 - 1.58	1.45
	D_2/D_1	1 - 2	1.5
	H/D_1	3.34 - 10	6
	S/D_1	0.167 - 0.2	0.2
 Provodnik-prozor	K	1.22 - 1.32	1.25
	H/D	8 - 6.7	6
	S/D	0.4 - 0.1	0.2
 Provodnik-niska konfiguracija	K	1.18 - 1.35	1.15 Provodnik-ploča
	H'/H	0.75 - 0.75	0
	H'/D	3 - 3	0
	S/D	1.4 - 0.05	-
 Provodnik-bočna konfiguracija	K	1.28 - 1.63	1.45
	H/D	2 - 10	6
	S/D	1 - 0.1	0.2
 Poduzna izolacija (Konfiguracija šiljak-šiljak)	K	1.03 - 1.66	1.35
	H'/H	0.2 - 0.9	0
	D_1/H	0.1 - 0.8	0.5

9.4. Korelacija između podnosivih napona i minimalnih vazdušnih rastojanja

Radi ostvarenja potrebnih standardizovanih napona, IEC 71-2, 28/115/FDIS preporučuje prikladne vrednosti odgovarajućih minimalnih vazdušnih rastojanja. Ove vrednosti su date u tabelama 9.4.1, 9.4.2. i 9.4.3.

Rastojanja, naravno, mogu biti i manja ako je to dokazano praksom ili teorijskim i eksperimentalnim istraživanjima.

Tabela 9.4.1. - Korelacija između standardnih podnosivih atmosferskih udarnih napona i minimalnih vazdušnih rastojanja

Standardni podnosivi atmosferski udarni napon kV	Minimalno rastojanje mm	
	Konfiguracija šiljaka	Konfiguracija provodnika
20	60	
40	60	
60	90	
75	120	
95	160	
125	220	
145	270	
170	320	
250	480	
325	630	
450	900	
550	1100	
650	1300	
750	1500	
850	1700	1600
950	1900	1700
1050	2100	1900
1175	2350	2200
1300	2600	2400
1425	2850	2600
1550	3100	2900
1675	3350	3100
1800	3600	3300
1950	3900	3600
2100	4200	3900

PRIMEDBA: - Standardni atmosferski udar je primenljiv na međufaznu i faznu izolaciju.

- Za faznu izolaciju, minimalna rastojanja su primenljiva za konfiguraciju provodnika i konfiguraciju šiljaka.
- Za međufaznu izolaciju minimalna rastojanja su primenljiva za konfiguraciju šiljaka.

Tabela 9.4.2. Korelacija između standardnih podnosivih sklopni udarnih napona i minimalnih faznih vazdušnih rastojanja

Standardni podnosivi sklopni udarni napon kV	Minimalno fazno rastojanje mm	
	Konfiguracija provodnika	Konfiguracija šiljaka
750	1600	1900
850	1800	2400
950	2200	2900
1050	2600	3400
1175	3100	4100
1300	3600	4800
1425	4200	5600
1550	4900	6400

Tabela 9.4.3. Korelacija između standardnih podnosivih sklopni udarnih napona i minimalnih međufaznih vazdušnih rastojanja.

Standardni podnosivi sklopni udarni napon			Minimalno međufazno vazdušno rastojanje mm	
Fazni kV	Međufazna — vrednost Fazna vrednost	Međufazni kV	Provodnik-provodnik paralelno	Šiljak-provodnik
750	1.5	1125	2300	2600
850	1.5	1275	2600	3100
850	1.6	1360	2900	3400
950	1.5	1425	3100	3600
950	1.7	1615	3700	4300
1050	1.5	1575	3600	4200
1050	1.6	1680	3900	4600
1175	1.5	1763	4200	5000
1300	1.7	2210	6100	7400
1425	1.7	2423	7200	9000
1550	1.6	2480	7600	9400

10. Problemi pouzdanosti rada izolacije u uslovima povećanog rizika

Karakteristike spoljašnje izolacije postrojenja se utvrđuju eksperimentalno na čistim elementarnim izolacionim konstrukcijama, obično u atmosferskim uslovima različitim od normalnih, ali se rezultati prezentiraju svedeni na normalne atmosferske uslove. Eksperimentalno se, za različite vrste napona, utvrđuju: 50% preskočni, odnosno, podnosivi naponi izolacionih konstrukcija ili njihove krive efekta. Ispitivana izolaciona konstrukcija se prethodno dovodi u čisto i ispitivanjima predviđeno stanje. Tako se dakle, podnosivi i preskočni naponi izolacionih konstrukcija za različite vrste napona, odnose na normalne uslove i uglavnom novu i čistu izolaciju.

U pogonu izolacija najčešće ne radi u normalnim atmosferskim uslovima, te su njene karakteristike podložne promenama, obično, pogoršanju, u skladu sa tim pogonskim uslovima.

Uslovi rada izolacije u kojima dolazi do osetnog gubitka njenih dielektričnih osobina, predstavljaju uslove povećanog i velikog rizika rada. Ovo se, naravno odnosi na spoljašnju izolaciju koja je predviđena da radi na otvorenim prostorima izložena atmosferskim uticajima. Unutrašnja izolacija ima svoje definisano mikrookruženje i nije izložena uticaju atmosfere.

Pored radnih uslova koji vode padu sposobnosti podnošenja napona izolacije, uslove povećanog rizika predstavlja i rad izolacije u konfiguracijama sa povišenim prenaponima za koje izolacija nije predviđena.

U uslove povećanog rizika rada izolacije, dakle, treba svrstati:

1. uslove rada čiste izolacije u atmosferi velike dugotrajne vlažnosti (magla, izmaglica, sitna kiša i sl.) pri čemu nastaje praktično svestrano vlaženje površina izolacije;
2. uslove rada izolacije u zagađenim sredinama koji zagađuju površine izolacije i zajedno sa vlagom iz atmosfere stvaraju diskontinualne ili kontinualne poluprovodne slojeve na celoj dužini strujnih staza;
3. uslove rada izolacije sa zaleđenim površinama izolacije, naročito ako je led formiran od zagađene vode posebno pri topljenju leda;
4. uslove rada izolacije u razređenoj atmosferi (visoka planinska područja);
5. uslove rada izolacije nakon isteka njenog predviđenog veka, odnosno pada sposobnosti podnošenja napona usled fenomena starenja;
6. uslove rada izolacije u konfiguracijama sa povišenim prenaponima uslovljenih uglavnom radom u neplaniranim režimima i konfiguracijama; itd.

Svim uslovima povećanog rizika rada izolacije zajednički efekat je veće ili manje povećanje rizika preskoka, odnosno, približavanje srednjih vrednosti nastajućih prenapona 50% preskočnim naponima izolacije, i dalje, njihovom nadmašivanju u ekstremnim slučajevima.

Uslovi povećanog rizika zbog prisustva strane poluprovodne supstance na površinama izolatora (uslovi 1,2 i 3), stvaraju, s obzirom na vrstu prenapona, vrlo različite efekte na gubitak dielektričnih sposobnosti izolacionih konstrukcija. Ovaj gubitak može biti izuzetno veliki pri delovanju naizmeničnog napona industrijske učestanosti, posebno dugotrajnim delovanjem pogonskog napona.

Zagađeni izolatori u suvom stanju, dakle bez poluprovodnih slojeva, za sve vrste primenjenih napona, praktično ne menjaju svoje preskočne karakteristike u odnosu na iste u suvom i čistom stanju.

Zagađeni izolatori u mokrom stanju, naročito svestrano ovlaženi-izolatori sa poluprovodnim slojem, u određenoj meri menjaju svoje krive efekta i za udarne napone; njihovi 50% preskočni naponi padaju, a standardna odstupanja rastu.

Pad preskočnih napona za sklopne i atmosfere udarne napone u odnosu na suvo stanje uslovljava preraspodelu napona duž izolatora usled prisustva neravnomernog poluprovodnog sloja.

Krive efekta u uslovima povećanog rizika se mogu utvrditi eksperimentalno, odnosno, mogu se proceniti na osnovu izvršenih eksperimentalnih rezultata u uslovima normalnog rizika. Publikovanih rezultata istraživanja u ovoj oblasti ima vrlo malo. Na osnovu ovih podataka i delom sprovedenih istraživanja u Institutu "Nikola Tesla", se ipak, može zaključiti da 50% preskočni napon spoljašnje izolacije u zagađenom mokrom stanju $u_{50,z}$ i standardno odstupanje σ_z u odnosu na suvo stanje ($u_{50,s}$, σ_s) u proseku iznose:

$$u_{50,z,s} \approx 0.9 u_{50,s,s} \quad (10.1)$$

$$\sigma_{z,s} \approx 1.1 \sigma_{s,s} \quad (10.2)$$

za sklopne prenapone, i

$$u_{50,z,a} \approx 0.95 u_{50,s,a} \quad (10.3)$$

$$\sigma_{z,a} \approx 1.05 \sigma_{s,a} \quad (10.4)$$

za atmosfere prenapone.

Za laka zagađenja izolacije padovi 50% preskočnih napona i porasti standardnog odstupanja su manji. Tako se procena rizika preskoka izolacije u uslovima rada povećanog rizika usled zagađenja, s obzirom na atmosfere i sklopne prenapone, može izvršiti primenom procenjenih krivih efekta za ove uslove.

Za slučaj uslova rada čistih izolatora u vlažnom stanju, padovi preskočnih, sklopnih i atmosferskih udarnih napona i porasti standardnih odstupanja, su u odnosu na iste zagađene izolatore, nešto manji.

O smanjenju sposobnosti podnošenja napona spoljašnje izolacije usled starenja praktično nema potrebnih podataka, pa se pri proračunima ovaj efekat ne može valjano proceniti. Starenje izolacije uslovljeno je uglavnom termičkim, električnim, hemijskim i mehaničkim naprezanjima kao i uticajem drugih faktora okruženja. Efekte ovih faktora, uključujući i nepoznate faktore obuhvata koeficijent sigurnosti.

IEC 71-2, 28/115 FDIS iz 1996.godine, sve faktore koji spuštaju podnosive napone izolacije, a koji nisu ni dovoljno istraženi, uključujući i starenje izolacije, sažima u jedan faktor sigurnosti K_s i preporučuje $K_s = 1.05$ za spoljašnju i $K_s = 1.15$ za unutrašnju izolaciju.

Atmosferski vazduh, koji okružuje izolacionu konstrukciju, predstavlja njen bitni element. U toku naponskih napreznja brojni procesi se odigravaju upravo u tom vazduhu uključujući i preskoke. Gustina vazduha, odnosno atmosferski pritisak, temperatura i vlaga utiču na njegova izolaciona svojstva, te i na krivu efekta izolacione konstrukcije, odnosno odgovarajuće 50% preskočne napone.

50% preskočni napon u razređenom vazduhu pritiska (b), temperature (t) i vlažnosti (h), $u_{50}(b,t,h)$ se može sračunati na osnovu poznatog 50% preskočnog napona za normalne uslove $u_{50}(b_o, t_o, h_o)$ ($b_o = 1013 \text{ mb}$, $t_o = 20 \text{ }^\circ\text{C}$, $h_o = 11 \text{ g/m}^3$), primenom relacije:

$$u_{50}(b,t,h) = u_{50}(b_o, t_o, h_o) \cdot \frac{K_d}{K_h} \quad (10.5)$$

Korekcionni faktori gustine K_d i vlažnosti K_h vazduha su:

$$K_d = \left(\frac{b}{b_o}\right)^m \left(\frac{273+t_o}{273+t}\right)^n, \quad (10.6)$$

$$K_a = K^w \quad (10.7)$$

Za jednosmerne i naizmjenične napone kao i atmosferske i sklopne udarne napone eksponenti w, m, n i baza korekcionog faktora vlažnosti vazduha "k", dati su u tabeli 10.1. i graficima na sl.10.1. i 10.02. i to za izolacione konstrukcije sa homogenim i nehomogenim električnim poljima tipa visećih i potpornih izolatora.

Za slučaj promene gustine, odnosno, pritiska vazduha zbog različitih nadmorskih visina objekata, potrebni podnosivi naponi spoljašnjih izolacionih konstrukcija objekta na nadmorskoj visini H, dobijaju se množenjem podnosivih napona na nadmorskoj visini $H=0$, odgovarajućim faktorima visinske korekcije:

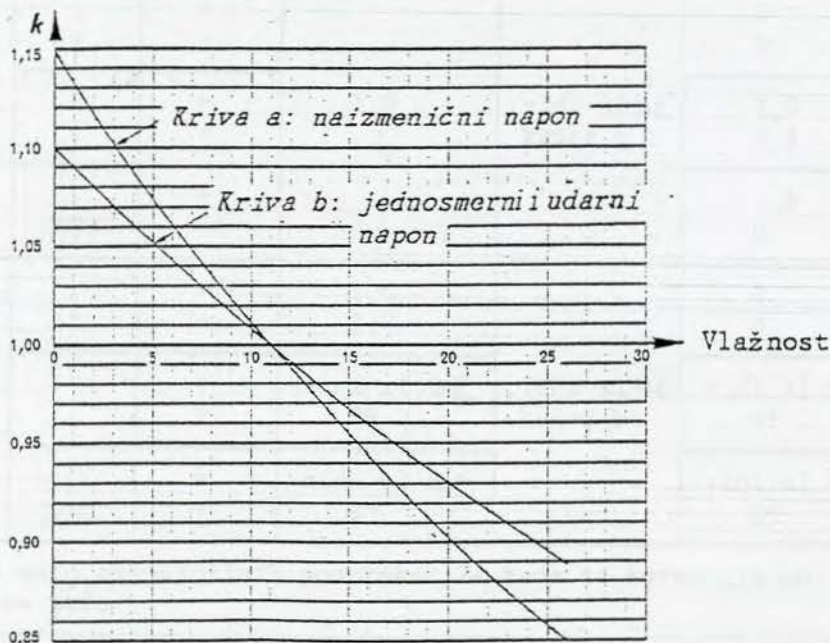
$$K_a = e^{m \frac{H}{8150}} \quad (10.8)$$

Ovde su:

H - nadmorska visina objekta u m ,










m - 1.0 za atmosferske podnosive udarne napone i naizmjenične napone industrijske učestanosti,

m - vrednosti sa sl. 10.03 za sklopne podnosive udarne napone.






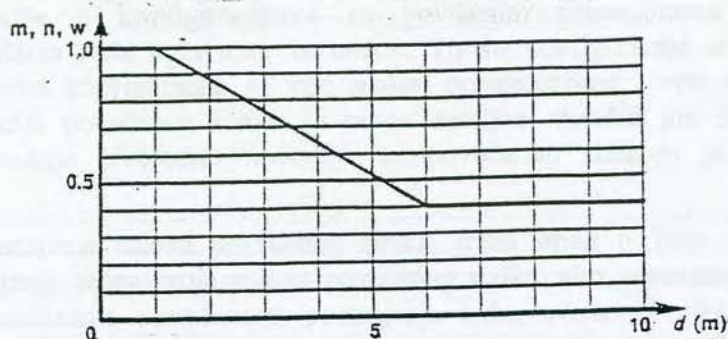
SL 10.1. Korekcionni faktor vlažnosti - k u zavisnosti od apsolutne vlažnosti

Tabela 10.1. Primena korekcionih faktora za atmosferske uslove

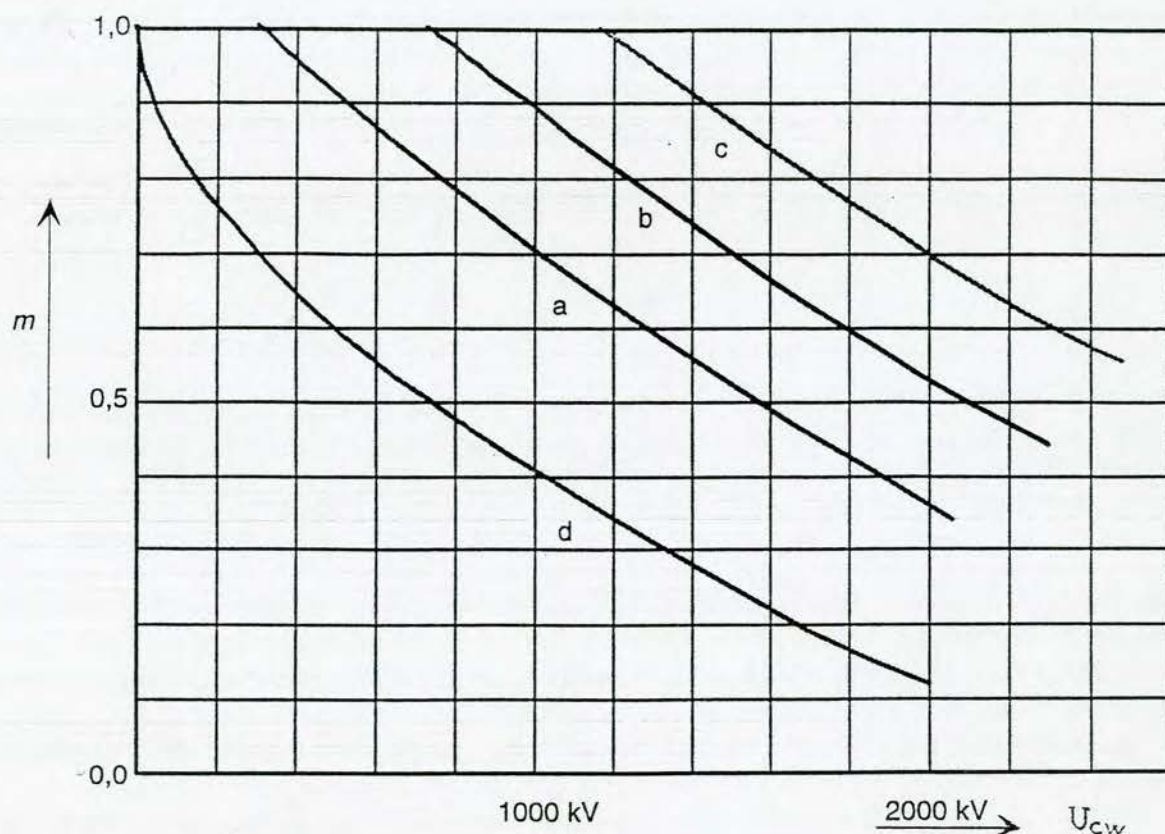
Vrsta napona	Oblik elektrode	Polaritet	Korekcija gustine. Eksponenti m i n	Korekcija vlažnosti	
				faktor k	eksponent w
Jednosmerni napon		+	1,0	vidi sl.10.1 kriva b	0
		-			0
		+			1,0
		-			0
Naizmernični napon			1,0		0
			vidi sl.10.2.	vidi sl.10.1 kriva a	vidi sl.10.2.
			vidi sl.10.2.		vidi sl.10.2.
Atmosferski udarni napon		+	1,0	vidi sl.10.1 kriva b	0
		-			0
		+			1,0
		-			0
Sklopni udarni napon		+	1,0	vidi sl.10.1 kriva b	0
		-	1,0		0
		+	vidi sl.10.2. 0*		vidi sl.10.2. 0*
		-	vidi sl.10.2. 0*		vidi sl.10.2. 0*

*Ima vrlo malo raspoloživih podataka. Za sada se korekcije po pravilu ne vrše.

-  homogeno polje
-  nehomogeno polje, izolaciona konstrukcija tipa lanca
-  nehomogeno polje, izolaciona konstrukcija tipa potpornog izolatora



Sl. 10.2. Vrednosti eksponentata m i n za korekciju gustine vazduha i w za korekciju vlažnosti u zavisnosti od preskočnog rastojanja



- a) fazna izolacija
- b) podužna izolacija
- c) međufazna izolacija
- d) šiljak-ploča (referentno iskrište).

Sl. 10.3. Zavisnost eksponenta m od koordinacionog podnosivog sklopnog udarnog napona

Za napone od dve komponente vrednost napona čini zbir komponentata.

Standardna odstupanja krivih efekta izolacionih konstrukcija u razređenoj atmosferi se praktično ne menjaju.

Na osnovu procenjenih i eventualno korigovanih 50% preskočnih napona i standardnih odstupanja, utvrđuju se i funkcije verovatnoća preskoka izolacionih konstrukcija na visokim planinskim područjima. Procedura daljih sračunavanja parametara pouzdanosti postrojenja na visokim područjima je ista kao i u slučaju rada izolacija u normalnim uslovima.

Uslovi rada izolacije u konfiguracijama sa povišenim prenaponima nastaju izborom ovih konfiguracija ili režima rada uglavnom iz nužde. To su konfiguracije sa dva ili više povezanih vodova u lancu, zatim konfiguracije sa vrlo malim opterećenjima i vrlo slabim izvorima itd. Ovi slučajevi konfiguracija povećanog rizika se mogu detaljno obraditi pre njihovog nastanka, pa se time operativno osoblje prethodno upoznaje sa povećanim rizikom pri korišćenju neredovnih konfiguracija.

Pri razmatranju nastajanja uslova povećanog rizika, treba imati u vidu da postoje i mogućnosti istovremenog nastajanja većeg broja uslova povećanog rizika; ako verovatnoće takvih slučajeva nisu zanemarljive, pri analizama pouzdanosti postrojenja treba uvažavati efekte njihovog zajedničkog delovanja.

Razmatranje pojedinačnih uslova nastajanja povećanog rizika treba vršiti u skladu sa [10] i [11]. U skladu sa [10] treba vršiti analizu uslova nastajanja povećanog rizika u konfiguracijama sa dva ili više povezanih vodova u lancu, zatim konfiguracije sa vrlo malim opterećenjima i vrlo slabim izvorima itd. Ovi slučajevi konfiguracija povećanog rizika se mogu detaljno obraditi pre njihovog nastanka, pa se time operativno osoblje prethodno upoznaje sa povećanim rizikom pri korišćenju neredovnih konfiguracija.

11.1. Konfiguracije sa dva ili više povezanih vodova u lancu

11.1.1. Uslovi nastajanja povećanog rizika

Analizirajući pojedinačne uslove nastajanja povećanog rizika u konfiguracijama sa dva ili više povezanih vodova u lancu, treba imati u vidu da postoje i mogućnosti istovremenog nastajanja većeg broja uslova povećanog rizika; ako verovatnoće takvih slučajeva nisu zanemarljive, pri analizama pouzdanosti postrojenja treba uvažavati efekte njihovog zajedničkog delovanja.

U konfiguracijama sa dva ili više povezanih vodova u lancu, treba vršiti analizu uslova nastajanja povećanog rizika u konfiguracijama sa dva ili više povezanih vodova u lancu, zatim konfiguracije sa vrlo malim opterećenjima i vrlo slabim izvorima itd. Ovi slučajevi konfiguracija povećanog rizika se mogu detaljno obraditi pre njihovog nastanka, pa se time operativno osoblje prethodno upoznaje sa povećanim rizikom pri korišćenju neredovnih konfiguracija.

U konfiguracijama sa dva ili više povezanih vodova u lancu, treba vršiti analizu uslova nastajanja povećanog rizika u konfiguracijama sa dva ili više povezanih vodova u lancu, zatim konfiguracije sa vrlo malim opterećenjima i vrlo slabim izvorima itd. Ovi slučajevi konfiguracija povećanog rizika se mogu detaljno obraditi pre njihovog nastanka, pa se time operativno osoblje prethodno upoznaje sa povećanim rizikom pri korišćenju neredovnih konfiguracija.

U konfiguracijama sa dva ili više povezanih vodova u lancu, treba vršiti analizu uslova nastajanja povećanog rizika u konfiguracijama sa dva ili više povezanih vodova u lancu, zatim konfiguracije sa vrlo malim opterećenjima i vrlo slabim izvorima itd. Ovi slučajevi konfiguracija povećanog rizika se mogu detaljno obraditi pre njihovog nastanka, pa se time operativno osoblje prethodno upoznaje sa povećanim rizikom pri korišćenju neredovnih konfiguracija.

U konfiguracijama sa dva ili više povezanih vodova u lancu, treba vršiti analizu uslova nastajanja povećanog rizika u konfiguracijama sa dva ili više povezanih vodova u lancu, zatim konfiguracije sa vrlo malim opterećenjima i vrlo slabim izvorima itd. Ovi slučajevi konfiguracija povećanog rizika se mogu detaljno obraditi pre njihovog nastanka, pa se time operativno osoblje prethodno upoznaje sa povećanim rizikom pri korišćenju neredovnih konfiguracija.

11. Koordinacija izolacije objekata visokih napona 400 kV, 220 kV i 110 kV elektroenergetskog sistema EPS

Izolacioni nivoi objekata visokih napona 400 kV, 220 kV i 110 kV u elektroenergetskom sistemu EPS su praktično najviši nivoi koji se predviđaju u propisima IEC 71-1/1993. Već duži period vremena razmišlja se o celishodnosti izbora ovako visokih izolacionih nivoa i postavlja se pitanje da li za nove ili revitalizovane objekte visokih napona 400 kV, 220 kV i 110 kV elektroenergetskog sistema EPS treba birati postojeće ili niže izolacione nivoe. Da bi se na ovo pitanje dao adekvatan odgovor potrebno je razmotriti pouzdanost rada izolacije objekata visokih napona sa nižim nivoima izolacije.

Razmatranje pouzdanosti rada izolacije objekata visokih napona 400 kV, 220 kV i 110 kV, odnosno, nadzemnih vodova i transformatorskih stanica u elektroenergetskom sistemu EPS od najviših do najnižih nivoa prema IEC 71-1/1993 je izvršeno pri delovanju atmosferskih i sklopnih prenapona. U transformatorskim stanicama izdvojen je posebno energetski transformator, kao ključni elemenat, i za njega su izvršena napred navedena razmatranja. Razmatranje pouzdanosti rada izolacije je izvršeno preko parametara pouzdanosti: rizika preskoka (proboja), očekivanih godišnjih brojeva preskoka, ispada i oštećenja, i prosečnih intervala vremena između dva uzastopna preskoka, ispada i oštećenja.

11.1. Koordinacija izolacije objekata 400 kV, 220 kV i 110 kV u oblasti atmosferskih prenapona

11.1.1 Uvodna razmatranja i osnove proračuna

Atmosferski prenaponi su značajan faktor u dimenzionisanju izolacije elektroenergetskog sistema, te je veoma bitno da se ovi što realnije procene. Pojavljuju se na izolaciji sistema kao posledica atmosferskih pražnjenja - udara groma direktno u fazne provodnike, u uzemljene delove nadzemnih vodova, razvodnih postrojenja i transformatorskih stanica i kao indukovani prenaponi pri udaru groma u okolinu elektroenergetskog sistema.

U radovima [55,56] detaljno su razmatrani uticaji parametara groma i stuba na napone koji se pojavljuju pri udaru groma. Razmatrani su uticaji: oblika struje groma, impedanse kanala groma, raspodela amplituda i strmina struja groma, impedanse stuba, brzine prostiranja naponskih i strujnih talasa duž stuba, visine stuba, otpornosti uzemljenja stuba i modela stuba (predstava stuba sa više vodova uvažavajući njegovu dispoziciju i konstruktivne elemente - model neekvivalentiranog stuba i predstava sa jednim vodom - model ekvivalentiranog stuba). Na osnovu analiza uticaja parametara groma i stubova nadzemnog voda na visinu napona pri udaru groma konstatovano je sledeće:

- Oblik struje groma, raspodele amplituda i strmina struja groma, kao i impedansa kanala groma bitno utiču na visinu napona stuba. Predstava groma kao strujnog izvora sa strujom trougaonog oblika, iako pojednostavljena, je prihvatljiva. Impedansu kanala groma treba birati u zavisnosti od intenziteta struje groma. U proračunu je poželjno koristiti raspodele amplituda prvih, a strmina prvih i ostalih komponenti struja groma.
- Stubove nadzemnih vodova kao i portale u transformatorskim stanicama treba predstavljati što detaljnije i u proračunu, gde je to moguće, izbegavati ekvivalentiranja. Ukoliko se posmatraju naponi na uzemljenju stuba, potrebno je poboljšati model uzemljenja stuba npr. predstaviti ga vodovima sa raspoređenim parametrima. Povećanjem impedanse, visine i otpornosti uzemljenja stuba dolazi do povišenja napona stuba.
- Raspodele amplituda i strmina struja groma, iako dominantne u oceni rizika preskoka pri udaru groma u delove elektroenergetskog sistema, su za našu zemlju još uvek ključna pretpostavka.

Obezbeđenjem ovih raspodela za naše podneblje obezbediće se povećanje valjanosti rezultata proračuna prenapona u objektima pri udaru groma.

Naponi pri udaru groma su razmatrani na nadzemnim vodovima, u razvodnim postrojenjima i transformatorskim stanicama napona 400 kV, 220 kV i 110 kV. Za njihov proračun usvojene su sledeće osnove:

- Grom je predstavljen strujnim generatorom čije su karakteristike korespondentne slučajno izabranoj struji groma. Monte Karlo simulacijom izabrano je 1000 generatora groma iz Bergerovih krivih verovatnoća pojave amplituda i strmina struja groma [12]; za amplitudu su uzete amplitude prvih komponenti, a za strmine, strmine svih komponenti jednog istog udara groma.
- Talasna impedansa kanala groma utvrđena je u zavisnosti od amplitude struje groma [16].
- Talas struje groma je predstavljen trougaonim oblikom.
- Stubovi nadzemnih vodova (portal, jela, Y stub), portali u razvodnim postrojenjima i transformatorskim stanicama, kao i ostali prostorni elementi (nadzemne i podzemne provodne veze i sl.) predstavljeni su kao vodovi sa raspoređenim parametrima, odnosno odgovarajućim talasnim impedansama i dužinama.
- Namotaji energetskih transformatora su predstavljeni kapacitivnostima prema zemlji, i između namotaja i talasnom impedansom reda 10 kΩ prema zemlji.
- Naponski i strujni transformatori, prekidači i rastavljači su predstavljeni kapacitivnostima prema zemlji.
- Uzemljenja: stubova, portala, energetskih transformatora i ostale opreme u TS su predstavljena koncentrisanom otpornošću.

Parametri nadzemnih vodova, razvodnih postrojenja i transformatorskih stanica, korišćeni u proračunu, dati su u tabelama 11.1.1.1 i 11.1.1.2.

Impedanse pojedinih delova stubova i stubova u celini računate su iz izraza datih u [15,25].

Sopstvene i međusobne impedanse provodnika u vazduhu računate su iz izraza datih u [25].

Impedanse provodnika sa uvažavanjem korone računate su iz izraza datih u [25].

Naponi i struje n paralelnih provodnika u vazduhu (ili krakova i zatega stubova i portala) kao i njihove ekvivalentne impedanse računate su iz sledećeg sistema jednačina:

$$\begin{aligned}
 u_1 &= \sum_{j=1}^n Z_{1,j} i_j , \\
 u_2 &= \sum_{j=1}^n Z_{2,j} i_j , \\
 &\vdots \\
 &\vdots \\
 u_n &= \sum_{j=1}^n Z_{n,j} i_j .
 \end{aligned}
 \tag{11.1.1.1}$$

Ovde su $Z_{1,j}$, $Z_{2,j}$, ..., $Z_{n,j}$ ($j=1$ do n) međusobne i sopstvene impedanse provodnika u vazduhu.

Zamenske sheme stubova: portal, jela i Y, koje su korišćene u proračunu, date su u [56].

Zamenske sheme portala u razvodnim postrojenjima i transformatorskim stanicama, koje su korišćene u proračunu, date su na sl. 11.1.1.1.

Odvodnici prenapona (bez iskrišta-metaloksidni i sa iskrištem) u proračunu su predstavljeni svojim U-I karakteristikama, a odvodnici sa iskrištem pored toga i naponom reagovanja. Izabrani su odvodnici prenapona domaće proizvodnje. U tabeli 11.1.1.3. date su U-I karakteristike izabranih odvodnika za atmosferske udarne struje i naponi reagovanja za odvodnike sa iskrištem. U-I karakteristike metaloksidnih odvodnika su uzete za struju oblika $1\mu s/5\mu s$, a za napone reagovanja odvodnika sa iskrištem uzeti su maksimalni udarni naponi reagovanja na čelu talasa.

Karakteristike spoljašnje i unutrašnje izolacije za atmosferske prenapone date su u vidu krivih efekta izraženih preko u_{50} -50% preskočnog, odnosno probojnog napona i σ - pogonskog standardnog odstupanja od u_{50} ($\sigma=0.05u_{50}$ za spoljašnju i unutrašnju izolaciju). Vrednost napona u_{50} je određena iz sledećeg izraza:

$$u_{50} = \frac{u_p}{1 - 1.282\sigma} \quad (11.1.1.2)$$

u_p - nazivni podnosivi atmosferski udarni napon (10% preskočni napon),

σ - laboratorijsko standardno odstupanje napona u_p (za unutrašnju izolaciju $\sigma=0.05$; za spoljašnju izolaciju $\sigma=0.03$).

Opređenje za 1000 slučajno izabranih generatora groma iz Bergerovih raspodela amplituda i strmina struje groma proisteklo je nakon razmatranja rizika preskoka na izolaciji nekoliko, stubova voda i portala u TS. Na iste je primenjeno po 10.000 udara groma. Odstupanja srednje vrednosti rizika preskoka posle 1000 udara groma od srednje vrednosti rizika preskoka posle 10.000 udara groma su zavisila od vrednosti ustanovljenih rizika. Konstatovano je da se srednja vrednost rizika preskoka posle 1000 udara groma (R_{1000}) približno nalazi u granicama:

- $0 < R_{1000} < 2.5 R_{10000}$ (R_{10000} - srednja vrednost rizika preskoka posle 10000 udara groma) kada je R_{10000} reda nekoliko promila,
- $0.5 R_{10000} < R_{1000} < 1.5 R_{10000}$ kada je R_{10000} nekoliko procenata,
- $0.9 R_{10000} < R_{1000} < 1.1 R_{10000}$ kada je R_{10000} nekoliko desetina procenata.

U konfiguracijama sa malim rizicima preskoka na izolaciji objekta, a koji bitno utiču na ukupnu pouzdanost rada izolacije objekta, umesto 1000 primenjivano je 10000 udara groma. Na taj način je povećana tačnost procene parametara pouzdanosti objekata.

Proračuni su izvršeni za sledeće standardne podnosive atmosferske udarne napone spoljašnje i unutrašnje izolacije:

400 kV: 1050 kV, 1175 kV, 1300 kV, 1425 kV,
 220 kV: 650 kV, 750 kV, 850 kV, 950 kV, 1050 kV,
 110 kV: 450 kV, 550 kV.

Podaci o u_{50} i σ spoljašnje i unutrašnje izolacije napred navedenih podnosivih atmosferskih udarnih napona dati su u tabeli 11.1.1.4. Spoljašnju izolaciju čine izolatorski lanci nadzemnih vodova, izolacione konstrukcije u razvodnim postrojenjima i transformatorskim stanicama i vazдушna rastojanja. Unutrašnju izolaciju čine prvenstveno izolacije namotaja energetskih i mernih transformatora.

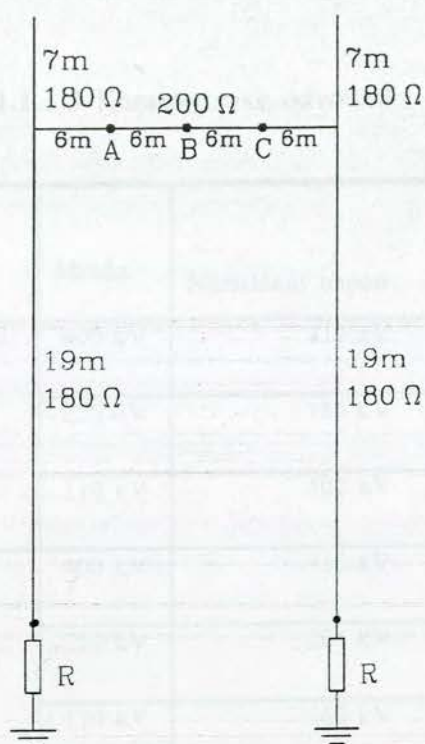
Proračuni napona i struja pri udaru groma vršeni su korišćenjem programskog paketa ATP-EMTP.

Tabela 11.1.1.1 Prosečne računске vrednosti parametara nadzemnih vodova visokih napona

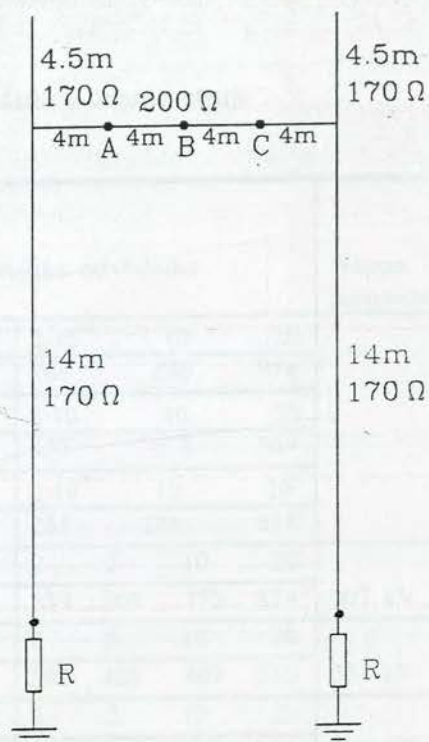
Veličina		Napon nadzemnog voda			
		400 kV	220 kV	110 kV	
Portalni stub sa 4 zatege	Visina stuba (m)	30	28	24	
	Srednja visina gromobranskog užeta (m)	28	26	22	
	Srednja visina faznih provodnika (m)	16	16	16	
	Impedanse delova stuba (Ω)	krak	220	220	220
		zatega	300	300	300
traverza (rigla)		200	200	200	
Stub Y	Visina stuba (m)	34			
	Srednja visina gromobranskog užeta (m)	32			
	Srednja visina faznih provodnika (m)	17			
Stub jela	Visina stuba (m)			25	
	Srednja visina gromobranskog užeta (m)			23	
	Srednja visina faznih provodnika (m)			14	
	Impedansa (Ω)			180	
Rastojanje između gromobranskih užadi i faza (m)		9	7	5.5	
Raspon (m)		350	300	230	
Impedansa jednog gromobranskog užeta (Ω)		400	400	400	
Ekvivalentna impedansa dva gromobranska užeta (Ω)		250	250	250	
Impedansa faznog provodnika (Ω)		300	400	400	
Otpornost uzemljenja stuba (Ω)		1-20	1-20	1-20	
Brzina prostiranja talasa na gromobranskim užadima, faznim provodnicima, stubovima i sl. (m/ μ s)		300	300	300	

Tabela 11.1.1.2 Prosečne računске vrednosti parametara razvodnih postrojenja i transformatorskih stanica

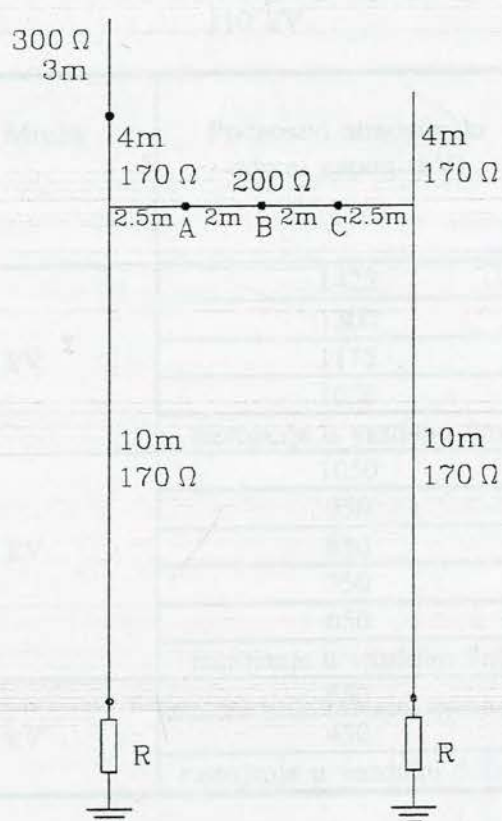
Veličina		Naponski nivo u razvodnom postrojenju i transformatorskoj stanici		
		400 kV	220 kV	110 kV
Visina kraka portala do rigle (m)		19	14	10
Rastojanje	fazni provodnik-susedni fazni provodnik (m)	6	4	2
	gromobransko uže-gromobransko uže (m)	24	16	9
	krak portala-krak portala (m)	24	16	9
Impedansa	krak portala (Ω)	180	170	170
	rigla (Ω)	200	200	200
	gromobransko uže (Ω)	400	400	400
	fazni provodnik (Ω)	350	400	400
	štapni gromobran (Ω)	300	300	300
Kapacitivnost	namotaj energetskog transformatora (pF)	1000	1000	1000
	strujni transformator (pF)	350	500	600
	kapacitivni naponski transformator (pF)	4400	4400	4400
	induktivni naponski transformator (pF)	120		
	prekidač (pF)	100	100	100
	rastavljač (pF)	100	100	100
Otpornost uzemljenja	krak portala (Ω)	1-10	1-10	1-10
	transformator, odvodnik prenapona, strujni i naponski transformator, prekidač i rastavljač (Ω)	10	10	10



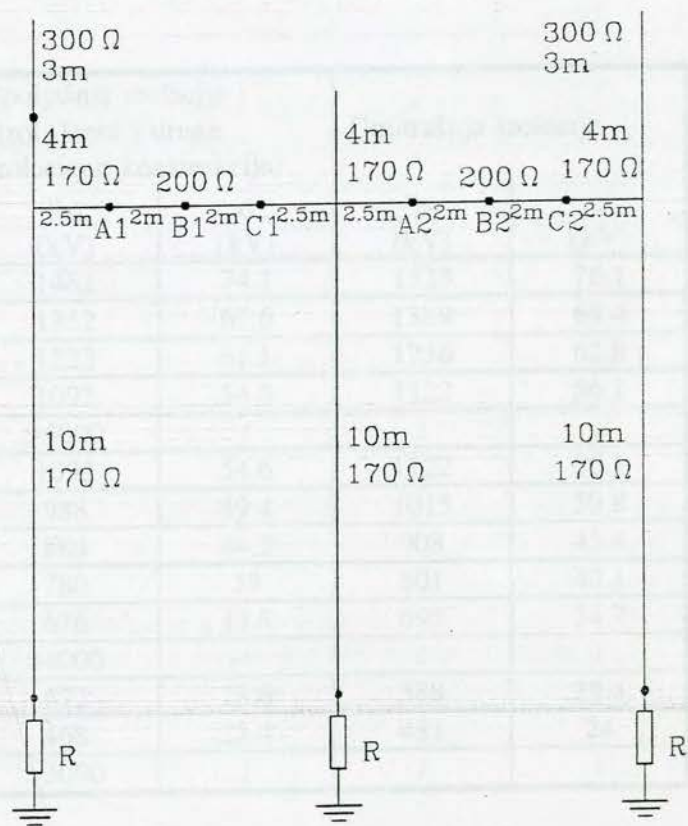
Portal 400kV



Portal 220kV



Dvokraki portal 110kV



Trokraki portal 110kV

Slika 11. 1.1.1. Zamenske šeme portala 400kV, 220kV i 110kV u razmatranim postrojenjima i transformatorskim stanicama korišćene u proračunu

Tabela 11.1.1.3 Karakteristike odvodnika prenapona za atmosferske udarne struje

Odvodnik prenapona	Mreža	Naznačeni napon	U-I karakteristika odvodnika				Napon reagovanja	
			I[kA]					
Metaloksidni odvodnik	400 kV	312 kV	I[kA]	$2 \cdot 10^{-6}$	10	20		
			U[kV]	766	860	954		
	220 kV	186 kV	I[kA]	$2 \cdot 10^{-6}$	10	20		
			U[kV]	457	513	569		
	110 kV	102 kV	I[kA]	$2 \cdot 10^{-6}$	10	20		
			U[kV]	255	286	317		
Odvodnik sa iskrištem	400 kV	336 kV	I[kA]	0	5	10	20	907 kV
			U[kV]	639	706	773	874	
	220 kV	204 kV	I[kA]	0	5	10	20	551 kV
			U[kV]	387	428	469	530	
	110 kV	108 kV	I[kA]	0	5	10	20	292 kV
			U[kV]	206	227	248	281	

Tabela 11.1.1.4 $u_{50-50\%}$ preskočni, odnosno probojni atmosferski naponi i σ -standardna odstupanja spoljašnje, odnosno unutrašnje izolacije mreža 400 kV, 220 kV i 110 kV

Mreža	Podnosivi atmosferski udarni napon (kV)	Spoljašnja izolacija (izol. lanci i druge izolacione konstrukcije)		Unutrašnja izolacija	
		u_{50} (kV)	σ (kV)	u_{50} (kV)	σ (kV)
400 kV	1425	1482	74.1	1523	76.1
	1300	1352	67.6	1389	69.4
	1175	1222	61.1	1256	62.8
	1050	1092	54.6	1122	56.1
	rastojanje u vazduhu 9m	>5000	/	/	/
220 kV	1050	1092	54.6	1122	56.1
	950	988	49.4	1015	50.8
	850	884	44.2	908	45.4
	750	780	39	801	40.1
	650	676	33.8	695	34.7
	rastojanje u vazduhu 7m	>4000	/	/	/
110 kV	550	572	28.6	588	29.4
	450	468	23.4	481	24
	rastojanje u vazduhu 5.5m	>3000	/	/	/

11.1.2. Koordinacija izolacije nadzemnih vodova 400 kV, 220 kV i 110 kV u oblasti atmosferskih prenapona

11.1.2.1. Prethodna objašnjenja

Nadzemni vodovi 400 kV, 220 kV i 110 kV imaju gromobransku zaštitu na celoj dužini, jedno ili dva gromobranska užeta.

Naponsko stanje nadzemnih vodova uslovljeno udarom groma, karakterišu sledeći skupovi prenapona:

- skupovi prenapona na izolatorskim lancima pri udaru groma u stub nadzemnog voda;
- skupovi prenapona na izolatorskim lancima i vazдушnim rastojanjima fazni provodnici - gromobransko uže pri udaru groma u gromobransko uže,
- skupovi prenapona na izolatorskim lancima pri prodoru groma kroz gromobransku zaštitu i udaru u fazne provodnike,
- skupovi prenapona na izolatorskim lancima pri udaru groma u bližu okolinu nadzemnog voda.

Isti su ustanovljeni na nadzemnim vodovima 110 kV, 220 kV i 400 kV primenom po 1000 udara groma.

Verovatnoće preskoka su izračunate za svaki pojedinačni udar groma od četiri nabrojane mogućnosti, na izolatorskim lancima faza 0, 4 i 8 stubova voda i na vazдушnim rastojanjima fazni provodnik - gromobranska užad.

Iz funkcija verovatnoća preskoka izolacija-krivih efekta za atmosferske udarne napone $P(u)$, koje su definisane 50% preskočnim udarnim naponom (u_{50}) i standardnim odstupanjem $\sigma=0.05u_{50}$ datim u tabeli 11.1.1.4., izračunate su, za utvrđene prenapone, verovatnoće preskoka na izolatorskim lancima faza 0, 4 i 8 stubova. Verovatnoće preskoka izolacije fazni provodnik-gromobransko uže za utvrđene prenapone, takođe su određene iz krivih efekta $P(u)$, koje su definisane 50% preskočnim udarnim naponom i standardnim odstupanjem $\sigma=0$ datim u tabeli 11.1.1.4. Ustanovljene su verovatnoće preskoka samo na jednoj bilo kojoj fazi (P_j), verovatnoće preskoka na dve ili tri faze (P_v) i verovatnoće preskoka na bilo kojoj izolaciji (ukupna verovatnoća P_s) pri jednom udaru groma. Iste su određene pri jednom udaru groma iz sledećih izraza:

$$P_j = [1 - (1 - P_0)(1 - P_{0-g})] (1 - P_4)(1 - P_8)(1 - P_{4-g})(1 - P_{8-g}) + [1 - (1 - P_4)(1 - P_{4-g})] (1 - P_0)(1 - P_8)(1 - P_{0-g})(1 - P_{8-g}) + [1 - (1 - P_8)(1 - P_{8-g})] (1 - P_0)(1 - P_4)(1 - P_{0-g})(1 - P_{4-g}) \quad (11.1.2.1.1.)$$

$$P_v = 1 - (1 - P_0)(1 - P_4)(1 - P_8)(1 - P_{0-g})(1 - P_{4-g})(1 - P_{8-g}) - P_j \quad (11.1.2.1.2.)$$

$$P_s = P_j + P_v = 1 - (1 - P_0)(1 - P_4)(1 - P_8)(1 - P_{0-g})(1 - P_{4-g})(1 - P_{8-g}) \quad (11.1.2.1.3.)$$

P_0 , P_4 i P_8 su verovatnoće preskoka spoljašnje izolacije faza 0, 4 i 8.

P_{0-g} , P_{4-g} i P_{8-g} su verovatnoće preskoka vazдушnih rastojanja između faznih provodnika 0,4 i 8 i gromobranskih užadi.

Verovatnoće P_0 , P_4 , P_8 , P_{0-g} , P_{4-g} i P_{8-g} su određene iz izraza:

$$P_0 = 1 - \prod_{i=1}^{i=s} (1 - P_{0,i}) \quad (11.1.2.1.4.)$$

$$P_4 = 1 - \prod_{i=1}^{i=s} (1 - P_{4,i}) \quad (11.1.2.1.5.)$$

$$P_s = 1 - \prod_{i=1}^{i=s} (1 - P_{s,i}) \quad (11.1.2.1.6.)$$

$$P_{0-g} = 1 - \prod_{i=1}^{i=r} (1 - P_{0-g,i}) \quad (11.1.2.1.7.)$$

$$P_{4-g} = 1 - \prod_{i=1}^{i=r} (1 - P_{4-g,i}) \quad (11.1.2.1.8.)$$

$$P_{8-g} = 1 - \prod_{i=1}^{i=r} (1 - P_{8-g,i}) \quad (11.1.2.1.9.)$$

Ovde su:

s - broj izolatorskih lanaca stuba faza 0,4 i 8,

r - broj vazdušnih rastojanja između faznih provodnika 0,4 i 8 i gromobranskih užadi na rasponu između dva susedna stuba.

$P_{0,i}$, $P_{4,i}$, $P_{8,i}$ - verovatnoće preskoka spoljašnje izolacije i-tog izolatorskog lanca stuba faza 0,4 i 8.

$P_{0-g,i}$, $P_{4-g,i}$, $P_{8-g,i}$ - verovatnoće preskoka i-tog vazdušnog rastojanja između faznih provodnika 0,4 i 8 i gromobranskih užadi.

Vrednosti rizika preskoka pri pojavi prenapona iz razmatranog skupa su jednake zbirovima utvrđenih verovatnoća za svaki udar groma podeljenih sa brojem udara. Izrazi za utvrđivanje rizika preskoka samo na jednoj fazi (R_j), na dve ili tri faze (R_v), i na bilo kojoj fazi (R_s) su sledeći:

$$R_j = \frac{\sum_{i=1}^N P_{j,i}}{N} \quad (11.1.2.1.10.)$$

$$R_v = \frac{\sum_{i=1}^N P_{v,i}}{N} \quad (11.1.2.1.11.)$$

$$R_s = \frac{\sum_{i=1}^N P_{s,i}}{N} \quad (11.1.2.1.12.)$$

N je broj udara groma.

11.1.2.2. Rizici preskoka na nadzemnim vodovima pri udaru groma u stub

Skupovi prenapona pri udaru groma u stub pripadaju grupi najuticajnijih prenapona uzrokovanih udarom groma u uzemljene delove nadzemnog voda. Oni su utvrđeni za sledeće stubove: portalni stub 400 kV, Y stub 400 kV, portalni stub 220 kV, portalni stub 110 kV i stub jela 110 kV. Sheme za proračun su obuhvatile pogođeni stub i po dva stuba sa svake njegove strane.

Od 1000 slučajno izabranih generatora groma koristeći elektrogeometrijsku metodu, izdvojeni su oni koji prodiru kroz gromobransku zaštitu i pogađaju fazni provodnik. Ostali generatori su primenjeni na vrh stuba. Na osnovu utvrđenih napona na izolatorskim lancima stubova i na vazdušnom rastojanju fazni provodnici - gromobranska užad, za svaki udar groma izračunate su verovatnoće preskoka, a na osnovu njih iz izraza (11.1.2.1.10.), (11.1.2.1.11) i (11.1.2.1.12.) rizici preskoka samo na jednoj fazi (R_j), na dve ili tri faze (R_v) i ukupan rizik preskoka - rizik preskoka na bilo kojoj fazi (R_s) kao njihov zbir. Tako su utvrđeni rizici preskoka na izolatorskim lancima napred navedenih stubova za njihove otpornosti uzemljenja: 20 Ω , 10 Ω , 5 Ω i 1 Ω . Navedene otpornosti

predstavljaju otpornosti uzemljenja stubova Y i jela, a za portalne stubove predstavljaju ekvivalentne otpornosti uzemljenja. Portalni stubovi imaju uzemljenja krakova portala (2 kraka) i zatega (4 zatege): pretpostavljeno je da su otpornosti uzemljenja tih elemenata identične. U proračunu su korišćene sledeće vrednosti: 120 Ω , 60 Ω , 30 Ω i 6 Ω . Na taj način su postignute ekvivalentne otpornosti uzemljenja stuba portala: 20 Ω , 10 Ω , 5 Ω i 1 Ω . Utvrđeni rizici preskoka samo na jednoj bilo kojoj (R_j), na dve bilo koje ili tri fazne izolacije (R_v), ili na bar jednoj izolaciji (R_c) su dati u tabelama 11.1.2.2.1, 11.1.2.2.2 i 11.1.2.2.3.

Tabela 11.1.2.2.1. Rizici preskoka na izolaciji stubova (portal, Y stub) nadzemnog voda 400 kV pri udaru groma u vrh stuba za različite otpornosti uzemljenja stuba i različite podnosive atmosferske udarne napone izolacije.

Stub	Ekvivalentna otpornost uzemljenja portalnog stuba, odnosno otpornost uzemljenja Y stuba (Ω)	Rizici preskoka samo na jednoj fazi (R_j), na dve ili tri faze (R_v) i ukupno (R_c) pri udaru groma u vrh stuba 400 kV za preskočni udarni napon vazdušnog rastojanja gromobransko uže-fazni provodnik 5000 kV i za podnosive atmosferske udarne napone izolacije: 1050 kV, 1175 kV, 1300 kV i 1425 kV				
			1050 kV	1175 kV	1300 kV	1425 kV
Portalni stub 400 kV	≤ 5	R_j	$<10^{-3}$	$<10^{-3}$	$<10^{-3}$	$<10^{-3}$
		R_v	$<10^{-3}$	$<10^{-3}$	$<10^{-3}$	$<10^{-3}$
		R_c	$<10^{-3}$	$<10^{-3}$	$<10^{-3}$	$<10^{-3}$
	10	R_j	0.008	0.004	0.001	$<10^{-3}$
		R_v	$<10^{-3}$	$<10^{-3}$	$<10^{-3}$	$<10^{-3}$
		R_c	0.008	0.004	0.001	$<10^{-3}$
	20	R_j	0.026	0.021	0.023	0.013
		R_v	0.057	0.026	0.017	0.007
		R_c	0.083	0.047	0.04	0.02
Y stub 400 kV	≤ 5	R_j	$<10^{-3}$	$<10^{-3}$	$<10^{-3}$	$<10^{-3}$
		R_v	$<10^{-3}$	$<10^{-3}$	$<10^{-3}$	$<10^{-3}$
		R_c	$<10^{-3}$	$<10^{-3}$	$<10^{-3}$	$<10^{-3}$
	10	R_j	0.019	0.007	0.004	$<10^{-3}$
		R_v	0.002	$<10^{-3}$	$<10^{-3}$	$<10^{-3}$
		R_c	0.021	0.007	0.004	$<10^{-3}$
	20	R_j	0.006	0.004	0.011	0.008
		R_v	0.082	0.047	0.032	0.023
		R_c	0.088	0.051	0.043	0.031

Tabela 11.1.2.2.2. Rizici preskoka na izolaciji portalnih stubova 220 kV pri udaru groma u vrh stuba za različite otpornosti uzemljenja stuba i različite podnosive atmosferske udarne napone izolacije

Stub	Ekvivalentna otpornost uzemljenja stuba (Ω)	Rizici preskoka samo na jednoj fazi (R_i), na dve ili tri faze (R_v) i ukupno (R_s) pri udaru groma u vrh stuba 220 kV za preskočni udarni napon vazdušnog rastojanja gromobransko uže-fazni provodnik 4000 kV i za podnosive atmosferske udarne napone izolacije: 650 kV, 750 kV, 850 kV, 950 kV i 1050 kV					
			650 kV	750 kV	850 kV	950 kV	1050 kV
Portalni stub 220 kV	1	R_i	0.009	0.001	$<10^{-3}$	$<10^{-3}$	$<10^{-3}$
		R_v	$<10^{-3}$	$<10^{-3}$	$<10^{-3}$	$<10^{-3}$	$<10^{-3}$
		R_s	0.009	0.001	$<10^{-3}$	$<10^{-3}$	$<10^{-3}$
	5	R_i	0.022	0.009	0.002	$<10^{-3}$	$<10^{-3}$
		R_v	$<10^{-3}$	$<10^{-3}$	$<10^{-3}$	$<10^{-3}$	$<10^{-3}$
		R_s	0.022	0.009	0.002	$<10^{-3}$	$<10^{-3}$
	10	R_i	0.046	0.036	0.028	0.019	0.012
		R_v	0.019	0.007	$<10^{-3}$	$<10^{-3}$	$<10^{-3}$
		R_s	0.065	0.043	0.028	0.019	0.012
	20	R_i	0.093	0.043	0.051	0.047	0.033
		R_v	0.128	0.096	0.073	0.038	0.028
		R_s	0.221	0.139	0.124	0.085	0.061

Tabela 11.1.2.2.3. Rizici preskoka na izolaciji stubova (portal, jela) 110 kV pri udaru groma u vrh stuba nadzemnog voda 110 kV za različite otpornosti uzemljenja stubova i različite podnosive atmosferske udarne napone izolacije.

Stub	Ekvivalentna otpornost uzemljenja portalnog stuba, odnosno otpornost uzemljenja stuba jela (Ω)	Rizici preskoka samo na jednoj fazi (R_j), na dve ili tri faze (R_v) i ukupno (R_s) pri udaru groma u vrh stuba 110 kV za preskočni udarni napon vazdušnog rastojanja gromobransko uže-fazni provodnik 3000 kV i za podnosive atmosferske udarne napone izolacije: 450 kV i 550 kV		
			450 kV	550 kV
Portalni stub 110 kV	1	R_j	0.015	0.007
		R_v	$<10^{-3}$	$<10^{-3}$
		R_s	0.015	0.007
	5	R_j	0.063	0.023
		R_v	0.002	$<10^{-3}$
		R_s	0.065	0.023
	10	R_j	0.082	0.049
		R_v	0.079	0.042
		R_s	0.161	0.091
	20	R_j	0.113	0.146
		R_v	0.257	0.157
		R_s	0.37	0.303
Stub jela 110 kV	1	R_j	0.068	0.063
		R_v	0.192	0.13
		R_s	0.26	0.193
	5	R_j	0.103	0.083
		R_v	0.238	0.171
		R_s	0.341	0.254
	10	R_j	0.128	0.103
		R_v	0.361	0.254
		R_s	0.489	0.357
	20	R_j	0.141	0.146
		R_v	0.556	0.423
		R_s	0.697	0.569

11.1.2.3 Rizici preskoka na nadzemnim vodovima 400 kV, 220 kV i 110 kV pri udaru groma u gromobransko uže

Udar groma u gromobransko uže je razmatran u rasponu između dva stuba. Shemom za proračun su obuhvaćena još po dva raspona sa svake strane razmatranog raspona. Mesto udara groma u gromobransko uže je birano slučajno pomoću Monte Karlo simulacije koristeći ravnomernu raspodelu, ali samo na dužini $l=l_r-2h_s$ počevši od rastojanja h_s daleko od stuba do (l_r-h_s) ; ovde su h_s -visina stuba i l_r -dužina raspona između dva stuba. Pretpostavljeno je da udari groma na udaljenosti do h_s sa svake strane stuba pogađaju stub, odnosno da su udari groma u gromobransko uže ekvivalentni udarima groma u stub.

Od 1000 slučajno izabranih gromova, odnosno, generatora groma, koristeći elektrometrijsku metodu, odvojeni su oni koji prodiru kroz gromobransku zaštitu i pogađaju fazni provodnik. Ostali generatori su primenjeni na gromobransko uže. Za svaki udar groma u gromobransko uže utvrđeni su naponi na izolatorskim lancima stubova kao i na vazдушnim rastojanjima gromobranska užad - fazni provodnici. Napred navedeni naponi su utvrđeni pri udaru groma u gromobransko uže na rasponu između sledećih stubova: portala 400 kV, Y stubova 400 kV, portala 220 kV, portala 110 kV i jela 110 kV, kada isti imaju otpornosti uzemljenja: 1Ω , 5Ω , 10Ω i 20Ω . Na osnovu izračunatih napona za svaki udar groma utvrđene su verovatnoće preskoka, a na osnovu njih prema izrazima (11.1.2.1.10.) i (11.1.2.1.11.) rizici preskoka na jednoj fazi (R_j), na dve ili tri faze (R_v) i ukupno ($R_{gu}=R_j+R_v$); isti su dati u tabelama 11.1.2.3.1., 11.1.2.3.2. i 11.1.2.3.3.

Tabela 11.1.2.3.1 Rizici preskoka na izolaciji nadzemnog voda 400 kV pri udaru groma u gromobransko uže za različite otpornosti uzemljenja stubova (portal, Y stub) i različite podnosive atmosferske udarne napone izolacije

Stub	Ekvivalentna otpornost uzemljenja stuba ili otpornost uzemljenja stuba (Ω)	Rizici preskoka samo na jednoj fazi (R_j), na dve ili tri faze (R_v) i ukupno (R_{gu}) pri udaru groma u gromobransko uže za preskočni udarni napon vazdušnog rastojanja gromobransko uže-fazni provodnik 5000 kV i za podnosive atmosferske udarne napone izolacije: 1050 kV, 1175 kV, 1300 kV i 1425 kV				
			1050 kV	1175 kV	1300 kV	1425 kV
Portalni stub 400 kV	≤ 10	R_j	0.008	0.008	0.008	0.008
		R_v	$<10^{-3}$	$<10^{-3}$	$<10^{-3}$	$<10^{-3}$
		R_{gu}	0.008	0.008	0.008	0.008
	20	R_j	0.015	0.012	0.008	0.008
		R_v	0.009	0.007	$<10^{-3}$	$<10^{-3}$
		R_{gu}	0.024	0.019	0.008	0.008
Y stub 400 kV	≤ 10	R_j	0.008	0.008	0.008	0.008
		R_v	$<10^{-3}$	$<10^{-3}$	$<10^{-3}$	$<10^{-3}$
		R_{gu}	0.008	0.008	0.008	0.008
	20	R_j	0.01	0.01	0.008	0.008
		R_v	0.015	0.013	0.004	0.001
		R_{gu}	0.025	0.023	0.012	0.009

Tabela 11.1.2.3.2 Rizici preskoka na izolaciji nadzemnog voda 220 kV pri udaru groma u gromobransko uže za različite otpornosti uzemljenja portalnih stubova i različite podnosive atmosferske udarne napone izolacije

Stub	Ekvivalentna otpornost uzemljenja stuba (Ω)	Rizici preskoka samo na jednoj fazi (R_j), na dve ili tri faze (R_v) i ukupno (R_{gu}) pri udaru groma u gromobransko uže za preskočni udarni napon vazdušnog rastojanja gromobransko uže-fazni provodnik 4000 kV i za podnosive atmosferske udarne napone izolacije: 650 kV, 750 kV, 850 kV, 950 kV i 1050 kV					
			650 kV	750 kV	850 kV	950 kV	1050 kV
Portalni stub 220 kV	1	R_j	0.024	0.024	0.024	0.024	0.024
		R_v	$<10^{-3}$	$<10^{-3}$	$<10^{-3}$	$<10^{-3}$	$<10^{-3}$
		R_{gu}	0.024	0.024	0.024	0.024	0.024
	5	R_j	0.032	0.03	0.026	0.024	0.024
		R_v	$<10^{-3}$	$<10^{-3}$	$<10^{-3}$	$<10^{-3}$	$<10^{-3}$
		R_{gu}	0.032	0.03	0.026	0.024	0.024
	10	R_j	0.038	0.034	0.029	0.027	0.024
		R_v	0.002	$<10^{-3}$	$<10^{-3}$	$<10^{-3}$	$<10^{-3}$
		R_{gu}	0.04	0.034	0.029	0.027	0.024
	20	R_j	0.058	0.065	0.047	0.028	0.035
		R_v	0.063	0.023	0.016	0.013	0.001
		R_{gu}	0.121	0.088	0.063	0.041	0.036

Tabela 11.1.2.3.3. Rizici preskoka na izolaciji nadzemnog voda 110 kV pri udaru groma u gromobransko uže za različite otpornosti uzemljenja stubova (portal, jela) i različite podnosive atmosferske udarne napone izolacije

Stub	Ekvivalentna otpornost uzemljenja stuba ili otpornost uzemljenja stuba (Ω)	Rizici preskoka samo na jednoj fazi (R_j), na dve ili tri faze (R_v) i ukupno (R_{gu}) pri udaru groma u gromobransko uže za podnosive atmosferske udarne napone vazdušnog rastojanja gromobransko uže-fazni provodnik 3000 kV i za podnosive atmosferske udarne napone izolacije 450 kV i 550 kV		
			450 kV	550 kV
Portalni stub 110 kV	1	R_j	0.05	0.05
		R_v	$<10^{-2}$	$<10^{-2}$
		R_{gu}	0.05	0.05
	5	R_j	0.069	0.056
		R_v	$<10^{-2}$	$<10^{-2}$
		R_{gu}	0.069	0.056
	10	R_j	0.092	0.074
		R_v	0.014	$<10^{-2}$
		R_{gu}	0.106	0.074
	20	R_j	0.122	0.088
		R_v	0.122	0.081
		R_{gu}	0.244	0.169
Stub jela 110 kV	1	R_j	0.104	0.088
		R_v	0.127	0.083
		R_{gu}	0.231	0.171
	5	R_j	0.117	0.107
		R_v	0.148	0.087
		R_{gu}	0.265	0.194
	10	R_j	0.094	0.118
		R_v	0.213	0.126
		R_{gu}	0.307	0.244
	20	R_j	0.139	0.094
		R_v	0.348	0.248
		R_{gu}	0.487	0.342

11.1.2.4. Rizici preskoka na nadzemnim vodovima 400 kV, 220 kV i 110 kV pri prodoru groma kroz gromobransku zaštitu i udaru u fazne provodnike

Od 1000 slučajno odabranih gromova, odnosno, generatora groma, primenom elektrogeometrijske metode [25], utvrđeni su oni koji mogu izvršiti prodor kroz gromobransku zaštitu i pogoditi fazne provodnike nadzemnih vodova: 400 kV sa portalnim i Y stubovima, 220 kV sa portalnim stubovima i 110 kV sa portalnim i jela stubovima.

Primenom utvrđenih generatora na jedan od faznih provodnika vodova 400 kV, 220 kV i 110 kV ustanovljeni su naponi na izolatorskim lancima stubova i na vazdušnim rastojanjima fazni provodnici- gromobranska užad. Na osnovu njih su izračunati rizici preskoka, kao zbrojevi veovatnoća preskoka svakog udara groma podijeljeni sa 1000 i dati u tabelama 11.1.2.4.1.,

11.1.2.4.2. i 11.1.2.4.3. Rizici su izračunati za sve razmatrane podnosive atmosferske udarne napone izolacije vodova 400 kV, 220 kV i 110 kV i predstavljaju rizike preskoka samo na jednoj fazi.

Za udarno rastojanje, korišćeno pri primeni elektrogeometrijske metode [25], usvojeno je ono koje preporučuje Working Group IEEE ($r=8 I^{0.65}$; r-udarno rastojanje u metrima; I-amplituda struje groma u kA).

Tabela 11.1.2.4.1. Rizici preskoka na izolaciji stubova (portal, Y) nadzemnog voda 400 kV pri prodoru groma kroz gromobransku zaštitu i udaru u fazne provodnike za različite podnosive atmosferske udarne napone izolacije

Stub 400 kV	Rizici preskoka pri prodoru groma kroz gromobransku zaštitu i udaru u fazne provodnike za podnosive atmosferske udarne napone izolacije: 1050 kV, 1175 kV, 1300 kV i 1425 kV			
	1050 kV	1175 kV	1300 kV	1425 kV
Portal	0.006	0.005	0.003	0.002
Y	0.007	0.005	0.004	0.003

Tabela 11.1.2.4.2. Rizici preskoka na izolaciji portalnih stubova nadzemnog voda 220 kV pri prodoru groma kroz gromobransku zaštitu i udaru u fazne provodnike za različite podnosive atmosferske udarne napone izolacije

Stub 220 kV	Rizici preskoka pri prodoru groma kroz gromobransku zaštitu i udaru u fazne provodnike za podnosive atmosferske udarne napone izolacije: 650 kV, 750 kV, 850 kV, 950 kV i 1050 kV				
	650 kV	750 kV	850 kV	950 kV	1050 kV
Portal	0.009	0.008	0.007	0.006	0.005

Tabela 11.1.2.4.3. Rizici preskoka na izolaciji stubova (portal, jela) nadzemnog voda 110 kV pri prodoru groma kroz gromobransku zaštitu i udaru u fazne provodnike za različite podnosive atmosferske udarne napone izolacije

Stub 110 kV	Rizici preskoka pri prodoru groma kroz gromobransku zaštitu i udaru u fazne provodnike za podnosive atmosferske udarne napone izolacije: 450 kV i 550 kV	
	450 kV	550 kV
Portal	0.011	0.009
Jela	0.01	0.009

11.1.2.5. Rizici preskoka pri udaru groma u okolinu nadzemnog voda sa gromobranskom zaštitom

Udar groma u okolinu nadzemnog voda uzrokuje indukovane napone u svim fazama. Ovi indukovani naponi (u kV) su sračunati na osnovu teorijsko - empirijskog izraza:

$$u_m = 30 \frac{h_{sr,f}}{s} I_g \quad (11.1.2.5.1.)$$

Ovde su:

$h_{sr,f}$ (m) - srednja visina faznih provodnika iznad zemlje,

s (m) - najmanje rastojanje od tačke udara groma do nadzemnog voda,

I_g (kA) - amplituda struje groma.

1000 slučajno izabranih struja groma primenjeno je u površinu širine 0.3 km sa svake strane nadzemnih vodova 110 kV, 220 kV i 400 kV izuzimajući atraktivnu površinu nadzemnog voda čija je širina sa svake strane voda jednaka trostrukoj srednjoj visini gromobranskog užeta. Rastojanje udara groma od nadzemnog voda je takođe birano slučajno koristeći Monte Karlo simulaciju.

Napon na izolatorskim lancima je računat iz sledećeg izraza:

$$u_{iz} = u_m + u_f \quad (11.1.2.5.2.)$$

Ovde su:

u_m - indukovani napon na faznom provodniku pri udaru groma u okolinu voda,

u_f - trenutna vrednost faznog napona voda (bira se slučajno koristeći Monte Karlo simulaciju).

Na osnovu utvrđenih vrednosti napona na izolatorskim lancima nadzemnih vodova 400 kV, 220 kV i 110 kV izračunate su verovatnoće preskoka, a na osnovu njih vrednosti rizika preskoka. Za vodove 400 kV sa portalnim i Y stubovima srednja vrednost rizika preskoka za podnosive atmosferske udarne napone izolacije 1425 kV, 1300 kV, 1175 kV i 1050 kV je $R_i < 10^{-4}$. Takođe, i za vodove 220 kV sa portalnim stubovima, srednja vrednost rizika preskoka za podnosive atmosferske udarne napone izolacije 1050 kV, 950 kV, 850 kV, 750 kV i 650 kV je $R_i < 10^{-4}$. Za vodove 110 kV sa portalnim stubovima i stubovima tipa jela srednja vrednost rizika preskoka za podnosive atmosferske udarne napone izolacije 450 kV i 550 kV je respektivno $R_i = 0.016$ i $R_i = 0.004$.

11.1.2.6. Očekivani godišnji brojevi preskoka na nadzemnim vodovima 400 kV, 220 kV i 110 kV pri udaru groma

Očekivani godišnji brojevi preskoka na nadzemnim vodovima 400 kV, 220 kV i 110 kV dužine 100 km usled udara groma u: stub, gromobransko uže, fazni provodnik ili okolinu nadzemnog voda, kao i ukupni očekivani godišnji broj preskoka za područja kerauničkog nivoa $T=40$ i za otpornosti uzemljenja stubova: 1Ω , 5Ω , 10Ω i 20Ω , dati su u tabelama 11.1.2.6.1., 11.1.2.6.2 i 11.1.2.6.3. Sračunati su na osnovu izraza:

$$n_{g,1 \text{ km}^2} = 0.04 T^{1.25} \quad (11.1.2.6.1.)$$

$$n_g = 0.1 (6h_{sr,gu} + b) n_{g,1 \text{ km}^2} \quad (11.1.2.6.2.)$$

$$n_{g,2S} = 100 \cdot 2S \cdot n_{g,1 \text{ km}^2} \quad (11.1.2.6.3.)$$

$$n_{g,s} = R_s \cdot n_g \cdot \frac{2h_s}{l_r} \quad (11.1.2.6.4.)$$

$$n_{g,gu} = R_{gu} \cdot n_g \left(1 - \frac{2h_s}{l_r}\right) \quad (11.1.2.6.5.)$$

$$n_{g,p} = R_p \cdot n_g \quad (11.1.2.6.6.)$$

$$n_{g,i} = R_i \cdot n_{g,2S} \quad (11.1.2.6.7.)$$

$$n_{g,v} = n_{g,s} + n_{g,gu} + n_{g,p} + n_{g,i} \quad (11.1.2.6.8.)$$

Ovde su:

n_g - godišnji broj udara groma u nadzemni vod dužine 100 km.

T - keraunički nivo,

b - rastojanje između gromobranskih užadi (m),

$h_{sr,gu}$ - srednja visina gromobranskih užadi (m),

$n_{g,2S}$ - godišnji broj udara groma u blizini nadzemnog voda dužine 100 km,

S - površina sa jedne strane nadzemnog voda dužine 1 km i širine $(300-3h_{sr,gu})10^{-3}$ km,

$n_{g,1 km^2}$ - godišnji broj udara groma u zemlju površine 1 km²,

$n_{g,s}$ - godišnji broj preskoka na izolatorima nadzemnog voda dužine 100 km usled udara groma u stub,

R_s - rizik preskoka na izolatorima usled udara groma u stub,

h_s - visina stuba (m),

l_r - dužina raspona između dva stuba (m),

$n_{g,gu}$ - godišnji broj preskoka na nadzemnom vodu dužine 100 km usled udara groma u gromobransko uže,

R_{gu} - rizik preskoka na nadzemnom vodu usled udara groma u gromobransko uže,

$n_{g,p}$ - godišnji broj preskoka na nadzemnom vodu dužine 100 km usled prodora groma kroz gromobransku zaštitu i udara u fazni provodnik,

R_p - rizik preskoka na nadzemnom vodu pri prodoru groma kroz gromobransku zaštitu i udaru u fazni provodnik,

R_i - rizik preskoka na nadzemnom vodu usled udara groma u njegovu okolinu (usled indukovanih prenapona),

$n_{g,i}$ - godišnji broj preskoka na izolatorima nadzemnog voda dužine 100 km usled indukovanih prenapona,

$n_{g,v}$ - ukupan godišnji broj preskoka na nadzemnom vodu dužine 100 km.

Kao što je napred navedeno u proračunu je korišćen izokeraunički nivo (prosečan broj grmljavinskih dana u godini) $T=40$. To je prema izokerauničkoj karti SR Jugoslavije (JUS NB.4.803) više od prosečnog izokerauničkog nivoa pa je ovim pooštrena ugroženost izolacije nadzemnih vodova pri udaru groma.

Tabela 11.1.2.6.1. Očekivani ukupni godišnji brojevi preskoka ($n_{g,v}$) na 100 km nadzemnog voda 400 kV za keraunički nivo T=40 ($n_g=72$ za portalne stubove; $n_g=81.6$ za Y stubove)

Ekvivalentna otpornost uzemljenja portalnog stuba, odnosno otpornost uzemljenja Y stuba	Očekivani ukupni godišnji broj preskoka ($n_{g,v}$) za keraunički nivo T=40 na 100 km nadzemnog voda 400 kV sa portalnim stubovima i stubovima tipa Y i izolacijom podnosivog atmosferskog udarnog napona: 1050 kV, 1175 kV, 1300 kV i 1425 kV								
		Portalni stub 400 kV				Y stub 400 kV			
		1050 kV	1175 kV	1300 kV	1425 kV	1050 kV	1175 kV	1300 kV	1425 kV
1	$n_{g,s}$	<0.012	<0.012	<0.012	<0.012	<0.016	<0.016	<0.016	<0.016
	$n_{g,sv1}$	0.477	0.477	0.477	0.477	0.526	0.526	0.526	0.526
	$n_{g,sv2}$	0.432	0.36	0.216	0.144	0.572	0.408	0.326	0.245
	$n_{g,v}$	<0.921	<0.849	<0.705	<0.633	<1.114	<0.95	<0.868	<0.787
5	$n_{g,s}$	<0.012	<0.012	<0.012	<0.012	<0.016	<0.016	<0.016	<0.016
	$n_{g,sv1}$	0.477	0.477	0.477	0.477	0.526	0.526	0.526	0.526
	$n_{g,sv2}$	0.432	0.36	0.216	0.144	0.572	0.408	0.326	0.245
	$n_{g,v}$	<0.921	<0.849	<0.705	<0.633	<1.114	<0.95	<0.868	<0.787
10	$n_{g,s}$	0.099	0.049	0.012	<0.012	0.333	0.111	0.063	<0.016
	$n_{g,sv1}$	0.477	0.477	0.477	0.477	0.526	0.526	0.526	0.526
	$n_{g,sv2}$	0.432	0.36	0.216	0.144	0.572	0.408	0.326	0.245
	$n_{g,v}$	1.008	0.886	0.705	<0.633	1.431	1.045	0.915	0.787
20	$n_{g,s}$	1.024	0.58	0.494	0.247	1.395	0.808	0.682	0.491
	$n_{g,sv1}$	1.431	1.133	0.477	0.477	1.644	1.512	0.789	0.592
	$n_{g,sv2}$	0.432	0.36	0.216	0.144	0.572	0.408	0.326	0.245
	$n_{g,v}$	2.887	2.073	1.187	0.868	3.611	2.728	1.797	1.328

Očekivani godišnji broj preskoka usled indukovanih prenapona je $n_{g,i} \approx 0$, jer je $R_i < 10^{-4}$.

Tabela 11.1.2.6.2. Očekivani godišnji ukupni brojevi preskoka ($n_{g,v}$) na 100 km nadzemnog voda 220 kV sa portalnim stubovima za keraunički nivo T=40 ($n_g=66$)

Ekvivalentna otpornost uzemljenja stuba (Ω)	Očekivani ukupni godišnji broj preskoka ($n_{g,v}$) za keraunički nivo T=40 na 100 km nadzemnog voda 220 kV sa portalnim stubovima i izolacijom podnosivog atmosferskog udrnog napona: 650 kV, 750 kV, 850 kV, 950 kV i 1050 kV					
		650 kV	750 kV	850 kV	950 kV	1050 kV
1	$n_{g,s}$	0.111	0.012	<0.012	<0.012	<0.012
	$n_{g,gu}$	1.288	1.288	1.288	1.288	1.288
	$n_{g,p}$	0.594	0.528	0.462	0.396	0.33
	$n_{g,v}$	1.993	1.828	<1.762	<1.696	<1.63
5	$n_{g,s}$	0.272	0.111	0.025	<0.012	<0.012
	$n_{g,gu}$	1.718	1.61	1.396	1.288	1.288
	$n_{g,p}$	0.594	0.528	0.462	0.396	0.33
	$n_{g,v}$	2.584	2.249	1.883	<1.696	<1.63
10	$n_{g,s}$	0.801	0.53	0.345	0.234	0.148
	$n_{g,gu}$	2.147	1.825	1.557	1.449	1.288
	$n_{g,p}$	0.594	0.528	0.462	0.396	0.33
	$n_{g,v}$	3.542	2.883	2.364	2.079	1.766
20	$n_{g,s}$	2.723	1.712	1.528	1.047	0.752
	$n_{g,gu}$	6.495	4.724	3.382	2.201	1.932
	$n_{g,p}$	0.594	0.528	0.462	0.396	0.33
	$n_{g,v}$	9.812	6.964	5.372	3.644	3.014

Očekivani godišnji broj preskoka usled indukovanih prenapona $n_{g,i} \approx 0$, jer je $R_i < 10^{-4}$.

Tabela 11.1.2.6.3. Očekivani ukupni godišnji brojevi preskoka ($n_{g,v}$) na 100 km nadzemnog voda 110 kV na portalnim stubovima i stubovima tipa jela za keraunički nivo T=40 ($n_g=55.6$ za portalni stub; $n_g=58$ za stub tipa jela)

Ekvivalentna otpornost uzemljenja portalnog stuba, odnosno, otpornost uzemljenja stuba jela (Ω)	Očekivani ukupni godišnji broj preskoka ($n_{g,v}$) za keraunički nivo T=40 na 100 km nadzemnog voda 110 kV sa portalnim stubovima i stubovima tipa jela sa izolacijom podnosivih atmosfernih udarnih napona 450 kV i 550 kV				
		Portalni stub 110 kV		Stub jela 110 kV	
		450 kV	550 kV	450 kV	550 kV
1	$n_{g,s}$	0.174	0.081	3.279	2.434
	$n_{g,gu}$	2.2	2.2	10.485	7.762
	$n_{g,p}$	0.611	0.5	0.58	0.522
	$n_{g,i}$	2.995	0.749	2.995	0.749
	$n_{g,v}$	5.98	3.53	17.339	11.467
5	$n_{g,s}$	0.754	0.267	4.3	3.203
	$n_{g,gu}$	3.036	2.464	12.028	8.806
	$n_{g,p}$	0.611	0.5	0.58	0.522
	$n_{g,i}$	2.995	0.749	2.995	0.749
	$n_{g,v}$	7.396	3.98	19.903	13.28
10	$n_{g,s}$	1.868	1.056	6.166	4.502
	$n_{g,gu}$	4.664	3.256	13.935	11.075
	$n_{g,p}$	0.611	0.5	0.58	0.522
	$n_{g,i}$	2.995	0.749	2.995	0.749
	$n_{g,v}$	10.138	5.561	23.676	16.848
20	$n_{g,s}$	4.292	3.515	8.789	7.175
	$n_{g,gu}$	10.736	7.436	22.105	15.523
	$n_{g,p}$	0.611	0.5	0.58	0.522
	$n_{g,i}$	2.995	0.749	2.995	0.749
	$n_{g,v}$	18.634	12.2	34.469	23.969

Godišnji broj udara groma u površinu 2S pored nadzemnog voda dužine 100 km za $n_{g,1} \text{ km}^2 = 4$ udara / 1 km^2 je:

$$n_{g,2S} = 100 \cdot 2S \cdot n_{g,1} \text{ km}^2 = 100 \cdot 2(0.3 - 0.066) \cdot 4 = 187.2$$

11.1.2.7. Očekivani godišnji brojevi ispada i oštećenja i prosečni intervali vremena između dva uzastopna preskoka, ispada i oštećenja nadzemnih vodova 400 kV, 220 kV i 110 kV pri udaru groma

Očekivani godišnji brojevi ispada i oštećenja i prosečni intervali vremena između dva uzastopna preskoka, ispada i oštećenja nadzemnih vodova dužine 100 km, zajedno sa prethodno izračunatim očekivanim ukupnim godišnjim brojem preskoka, predstavljaju pokazatelje pouzdanosti rada nadzemnih vodova s obzirom na atmosferska pražnjenja; isti su dati u tabelama 11.1.2.7.1., 11.1.2.7.2., 11.1.2.7.3. i 11.1.2.7.4.

Prosečni intervali vremena između dva uzastopna preskoka (T_p), očekivani godišnji brojevi ispada (n_i) i oštećenja (n_{ot}) i prosečni intervali vremena između dva uzastopna ispada (T_i) i oštećenja (T_{ot}) nadzemnih vodova 400 kV, 220 kV i 110 kV, svedeni na 100 km dužine voda, sračunati su na osnovu izraza:

$$T_p = \frac{1}{n_{g,v}} \quad (11.1.2.7.1.)$$

$$n_i = n_{g,v} (1 - P_{APU}) \quad (11.1.2.7.2.)$$

$$n_{ot} = P_{ot} n_i \quad (11.1.2.7.3.)$$

$$T_i = \frac{1}{n_{g,v} (1 - P_{APU})} \quad (11.1.2.7.4.)$$

$$T_{ot} = \frac{1}{n_{g,v} P_{ot} (1 - P_{APU})} \quad (11.1.2.7.5.)$$

Ovde su:

$n_{g,v}$ - ukupan očekivani godišnji broj preskoka na nadzemnom vodu dužine 100 km pri udaru groma, definisan izrazom (11.1.2.6.8.),

P_{ot} - verovatnoća oštećenja izolacije voda usled atmosferskih pražnjenja; usvojeno $P_{ot}=0.1$,

P_{APU} - verovatnoća uspešnog delovanja jednofaznog i trofaznog APU usled atmosferskih pražnjenja; usvojeno $P_{APU}=0.9$.

Kada se na nadzemnim vodovima ne koristi trofazno APU već samo jednofazno, preskok na više faza voda dovodi do njihovog ispada. Tada se očekivani godišnji brojevi ispada (n_i) i prosečni intervali vremena između dva uzastopna ispada (T_i) dobijaju iz sledećih izraza:

$$n_i = n_{g,v,j} (1 - P_{APU}) + n_{g,v,v} \quad (11.1.2.7.6.)$$

$$n_{g,v} = n_{g,v,j} + n_{g,v,v} \quad (11.1.2.7.7.)$$

$$T_i = \frac{1}{n_{g,v,j} (1 - P_{APU}) + n_{g,v,v}} = \frac{1}{n_{g,v} - n_{g,v,j} P_{APU}} \quad (11.1.2.7.8.)$$

Ovde su:

$n_{g,v}$ - ukupan očekivani godišnji broj preskoka na nadzemnom vodu 400 kV dužine 100 km pri udaru groma,

$n_{g,v,j}$ - ukupan očekivani godišnji broj jednofaznih preskoka na nadzemnom vodu 400 kV dužine 100 km pri udaru groma,

Tabela 11.1.2.7.1 Očekivani ukupni godišnji brojevi preskoka, ispada i oštećenja i prosečni intervali vremena između dva uzastopna preskoka, ispada i oštećenja nadzemnih vodova 400 kV dužine 100 km sa portalnim stubovima za keraunički nivo T=40, usled udara groma u vod.

Podnosivi atmosferski udarni napon izolacije	Ekvivalentna otpornost uzemljenja stuba (Ω)	Očekivani godišnji broj preskoka- $n_{g,v}$ (preskok/god.)	Očekivani godišnji broj ispada- n_i (ispad/god.)	Očekivani godišnji broj oštećenja- n_{ot} (oštećenje/god.)	Prosečan interval vremena između dva uzastopna preskoka- T_p (god.)	Prosečan interval vremena između dva uzastopna ispada- T_i (god.)	Prosečan interval vremena između dva uzastopna oštećenja T_{ot} (god.)
1050 kV	1	<0.921	<0.092	<0.009	<1.086	>10.9	>109
	5	<0.921	<0.092	<0.009	<1.086	>10.9	>109
	10	1.008	0.101	0.01	0.992	9.9	99
	20	2.887	0.289	0.029	0.346	3.5	35
1175 kV	1	<0.849	<0.085	<0.008	<1.178	>11.8	>118
	5	<0.849	<0.085	<0.008	<1.178	>11.8	>118
	10	0.886	0.089	0.009	<1.178	>11.8	>118
	20	2.073	0.207	0.021	0.482	4.8	48
1300 kV	1	<0.705	<0.07	<0.007	<1.418	>14.2	>142
	5	<0.705	<0.07	<0.007	<1.418	>14.2	>142
	10	0.705	<0.07	<0.007	<1.418	>14.2	>142
	20	1.187	0.119	0.012	0.842	8.4	84
1425 kV	1	<0.633	<0.063	<0.006	<1.58	>15.8	>158
	5	<0.633	<0.063	<0.006	<1.58	>15.8	>158
	10	<0.633	<0.063	<0.006	<1.58	>15.8	>158
	20	0.868	0.087	0.009	1.152	11.5	115

Tabela 11.1.2.7.2: Očekivani ukupni godišnji brojevi preskoka, ispada i oštećenja i prosečni intervali vremena između dva uzastopna preskoka, ispada i oštećenja nadzemnih vodova 400 kV dužine 100 km sa stubovima tipa Y za keraunički nivo T=40, usled udara u vod.

Podnosivi atmosferski udarni napon izolacije	Ekvivalentna otpornost uzemljenja stuba (Ω)	Očekivani godišnji broj preskoka- $n_{g,v}$ (preskok/god.)	Očekivani godišnji broj ispada- n_i (ispad/god.)	Očekivani godišnji broj oštećenja- n_{ot} (oštećenje/god.)	Prosečan interval vremena između dva uzastopna preskoka- T_p (god.)	Prosečan interval vremena između dva uzastopna ispada- T_i (god.)	Prosečan interval vremena između dva uzastopna oštećenja T_{ot} (god.)
1050 kV	1	<1.114	<0.111	<0.011	>0.898	>9	>90
	5	<1.114	<0.111	<0.011	>0.898	>9	>90
	10	1.431	0.143	0.014	0.699	7	70
	20	3.611	0.361	0.036	0.277	2.8	28
1175 kV	1	<0.95	<0.09	<0.009	>1.053	>11.1	>111
	5	<0.95	<0.09	<0.009	>1.053	>11.1	>111
	10	1.045	0.104	0.01	0.957	9.5	96
	20	2.728	0.273	0.027	0.367	3.7	37
1300 kV	1	<0.868	<0.087	<0.009	>1.152	>11.5	>115
	5	<0.868	<0.087	<0.009	>1.152	>11.5	>115
	10	0.915	0.092	0.009	1.093	10.9	109
	20	1.797	0.18	0.018	0.556	5.6	56
1425 kV	1	<0.787	<0.079	<0.008	>1.271	>12.7	>127
	5	<0.787	<0.078	<0.008	>1.271	>12.7	>127
	10	0.787	0.079	0.008	>1.271	>12.7	>127
	20	1.328	0.133	0.013	0.753	7.5	75

Tabela 11.1.2.7.3: Očekivani ukupni godišnji brojevi preskoka, ispada i oštećenja i prosečni intervali vremena između dva uzastopna preskoka, ispada i oštećenja nadzemnih vodova 220 kV sa portalnim stubovima dužine 100 km za keraunički nivo T=40, usled udara groma u vod.

Podnosivi atmosferski udarni napon izolacije	Ekvivalentna otpornost uzemljenja stuba (Ω)	Očekivani godišnji broj preskoka- $n_{g,v}$ (preskok/god.)	Očekivani godišnji broj ispada- n_i (ispad/god.)	Očekivani godišnji broj oštećenja- n_{ot} (oštećenje/god.)	Prosečan interval vremena između dva uzastopna preskoka- T_p (god.)	Prosečan interval vremena između dva uzastopna ispada- T_i (god.)	Prosečan interval vremena između dva uzastopna oštećenja T_{ot} (god.)
650 kV	1	1.993	0.199	0.02	0.502	5	50
	5	2.584	0.258	0.026	0.387	3.9	39
	10	3.542	0.354	0.035	0.282	2.8	28
	20	9.812	0.981	0.098	0.102	1	10
750 kV	1	1.828	0.183	0.018	0.547	5.5	55
	5	2.249	0.225	0.022	0.445	4.4	44
	10	2.883	0.288	0.029	0.347	3.5	35
	20	6.964	0.696	0.07	0.144	1.4	14
850 kV	1	<1.762	<0.176	<0.018	>0.568	>5.7	>57
	5	1.883	0.188	0.019	0.531	5.3	53
	10	2.364	0.236	0.024	0.432	4.2	42
	20	5.372	0.537	0.054	0.186	1.9	19
950 kV	1	<1.696	<0.17	<0.017	>0.59	>5.9	>59
	5	<1.696	<0.17	<0.017	>0.59	>5.9	>59
	10	2.079	0.208	0.021	0.481	4.8	48
	20	3.644	0.364	0.036	0.274	2.7	27
1050 kV	1	<1.63	<0.163	<0.016	>0.613	>6.1	>61
	5	<1.63	<0.163	<0.016	>0.613	>6.1	>61
	10	1.766	0.177	0.018	0.566	5.7	57
	20	3.014	0.301	0.03	0.332	3.3	33

Tabela 11.1.2.7.4: Očekivani ukupni godišnji brojevi preskoka, ispada i oštećenja i prosečni intervali vremena između dva uzastopna preskoka, ispada i oštećenja nadzemnih vodova 110 kV dužine 100 km za keraunički nivo T=40, usled udara groma u vod.

Podnosivi atmosferski udarni napon izolacije		Ekvivalentna otpornost uzemljenja stuba (Ω)	Očekivani godišnji broj preskoka- $n_{g,v}$ (preskok/god.)	Očekivani godišnji broj ispada- n_i (ispad/god.)	Očekivani godišnji broj oštećenja- n_{ot} (oštećenje/god.)	Prosečan interval vremena između dva uzastopna preskoka- T_p (god.)	Prosečan interval vremena između dva uzastopna ispada- T_i (god.)	Prosečan interval vremena između dva uzastopna oštećenja T_{ot} (god.)
Portalni stub	450 kV	1	5.98	0.598	0.06	0.167	1.7	17
		5	7.396	0.74	0.074	0.135	1.4	14
		10	10.138	1.014	0.101	0.099	0.99	9.9
		20	18.634	1.863	0.186	0.054	0.54	5.4
	550 kV	1	3.53	0.353	0.035	0.283	2.8	28
		5	3.98	0.398	0.04	0.251	2.5	25
		10	5.561	0.556	0.056	0.18	1.8	18
		20	12.2	1.22	0.122	0.082	0.82	8.2
Stub tipa jela	450 kV	1	17.339	1.734	0.173	0.058	0.58	5.8
		5	19.903	1.99	0.199	0.05	0.5	5
		10	23.676	2.368	0.237	0.042	0.42	4.2
		20	34.469	3.447	0.345	0.029	0.29	2.9
	550 kV	1	11.467	1.147	0.115	0.087	0.87	8.7
		5	13.28	1.328	0.133	0.075	0.75	7.5
		10	16.848	1.685	0.169	0.059	0.59	5.9
		20	23.969	2.397	0.24	0.042	0.42	4.2

Tabela 11.1.2.7.5: Očekivani ukupni godišnji brojevi preskoka, ispada i oštećenja i prosečni intervali vremena između dva uzastopna preskoka, ispada i oštećenja nadzemnih vodova 110 kV dužine 100 km za keraunički nivo T=40 (uvaženo starenje i visinska korekcija za prosečnu nadmorsku visinu vodova od 400 m sniženjem 50% preskočnih napona izolacije za 10%), usled udara groma u vod.

Podnosivi atmosferski udarni napon izolacije		Ekvivalentna otpornost uzemljenja stuba (Ω)	Očekivani godišnji broj preskoka- $n_{g,v}$ (preskok/god.)	Očekivani godišnji broj ispada- n_i (ispad/god.)	Očekivani godišnji broj oštećenja- n_{ot} (oštećenje/god.)	Prosečan interval vremena između dva uzastopna preskoka- T_p (god.)	Prosečan interval vremena između dva uzastopna ispada- T_i (god.)	Prosečan interval vremena između dva uzastopna oštećenja T_{ot} (god.)
Portalni stub	450 kV	1	7.1	0.71	0.071	0.14	1.4	14
		5	9.1	0.91	0.091	0.11	1.1	11
		10	12.1	1.21	0.121	0.083	0.83	8.3
		20	22	2.2	0.22	0.045	0.45	4.5
	550 kV	1	4.8	0.48	0.048	0.21	2.1	21
		5	6.1	0.61	0.061	0.16	1.6	16
		10	8.2	0.82	0.082	0.12	1.2	12
		20	15.8	1.58	0.158	0.063	0.63	6.3
Stub tipa jela	450 kV	1	20.5	2.05	0.205	0.049	0.49	4.9
		5	24	2.4	0.24	0.042	0.42	4.2
		10	28	2.8	0.28	0.036	0.36	3.6
		20	40	4	0.4	0.025	0.25	2.5
	550 kV	1	14.5	1.45	0.145	0.069	0.69	6.9
		5	16.5	1.65	0.165	0.061	0.61	6.1
		10	20.5	2.05	0.205	0.049	0.49	4.9
		20	29	2.9	0.29	0.034	0.34	3.4

Tabela 11.1.2.7.6 Očekivani ukupni godišnji brojevi preskoka, ispada i oštećenja i prosečni intervali vremena između dva uzastopna preskoka, ispada i oštećenja nadzemnih vodova 400 kV dužine 100 km sa portalnim stubovima za keraunički nivo T=40 (uvaženo starenje i visinska korekcija za prosečnu nadmorsku visinu vodova od 400 m sniženjem 50% preskočnih napona izolacije za 10%), usled udara groma u vod.

Podnosivi atmosferski udarni napon izolacije	Ekvivalentna otpornost uzemljenja stuba (Ω)	Očekivani godišnji broj preskoka- $n_{g,v}$ (preskok/god.)	Očekivani godišnji broj ispada- n_i (ispad/god.)	Očekivani godišnji broj oštećenja- n_{ot} (oštećenje/god.)	Prosečan interval vremena između dva uzastopna preskoka- T_p (god.)	Prosečan interval vremena između dva uzastopna ispada- T_i (god.)	Prosečan interval vremena između dva uzastopna oštećenja T_{ot} (god.)
1050 kV	1	<0.99	<0.099	<0.0099	>1	>10	>100
	5	<0.99	<0.099	<0.0099	>1	>10	>100
	10	1.15	0.115	0.0115	0.87	8.7	87
	20	3.8	0.38	0.038	0.26	2.6	26
1175 kV	1	<0.92	<0.092	<0.0092	>1.08	>10.8	>108
	5	<0.92	<0.092	<0.0092	>1.08	>10.8	>108
	10	1.0	0.1	0.01	1	10	100
	20	2.8	0.28	0.028	0.36	3.6	36
1300 kV	1	<0.85	<0.085	<0.0085	>1.17	>11.7	>117
	5	<0.85	<0.085	<0.0085	>1.17	>11.7	>117
	10	0.89	0.089	0.0089	1.12	11.2	112
	20	2.1	0.21	0.021	0.48	4.8	48
1425 kV	1	<0.71	<0.071	<0.0071	>1.4	>14	>140
	5	<0.71	<0.071	<0.0071	>1.4	>14	>140
	10	0.7	0.07	0.007	1.43	14.3	143
	20	1.2	0.12	0.012	0.83	8.3	83

Tabela 11.1.2.7.7: Očekivani ukupni godišnji brojevi preskoka, ispada i oštećenja i prosečni intervali vremena između dva uzastopna preskoka, ispada i oštećenja nadzemnih vodova 400 kV dužine 100 km sa stubovima tipa Y za keramički nivo T=40 (uvaženo starenje i visinska korekcija za prosečnu nadmorsku visinu vodova od 400 m sniženjem 50% preskočnih napona izolacije za 10%), usled udara groma u vod.

Podnosivi atmosferski udarni napon izolacije	Ekvivalentna otpornost uzemljenja stuba (Ω)	Očekivani godišnji broj preskoka- $n_{g,v}$ (preskok/god.)	Očekivani godišnji broj ispada- n_i (ispad/god.)	Očekivani godišnji broj oštećenja- n_{ot} (oštećenje/god.)	Prosečan interval vremena između dva uzastopna preskoka- T_p (god.)	Prosečan interval vremena između dva uzastopna ispada- T_i (god.)	Prosečan interval vremena između dva uzastopna oštećenja T_{ot} (god.)
1050 kV	1	<1.3	<0.13	<0.013	>0.77	>7.7	>77
	5	<1.3	<0.13	<0.013	>0.77	>7.7	>77
	10	1.9	0.19	0.019	0.53	5.3	53
	20	4.3	0.43	0.043	0.23	2.3	23
1175 kV	1	<1.1	<0.11	<0.011	>0.91	>9.1	>91
	5	<1.1	<0.11	<0.011	>0.91	>9.1	>91
	10	1.4	0.14	0.014	0.71	7.1	71
	20	3.6	0.36	0.036	0.28	2.8	28
1300 kV	1	<0.96	<0.096	<0.0096	>1.04	>10.4	>104
	5	<0.96	<0.096	<0.0096	>1.04	>10.4	>104
	10	1.1	0.11	0.011	0.91	9.1	91
	20	2.8	0.28	0.028	0.36	3.6	36
1425 kV	1	<0.87	<0.087	<0.0087	>1.15	>11.5	>115
	5	<0.87	<0.087	<0.0087	>1.15	>11.5	>115
	10	0.92	0.092	0.0092	1.07	10.7	107
	20	1.8	0.18	0.018	0.56	5.6	56

Tabela 11.1.2.7.8: Očekivani ukupni godišnji brojevi preskoka, ispada i oštećenja i prosečni intervali vremena između dva uzastopna preskoka, ispada i oštećenja nadzemnih vodova 220 kV sa portalnim stubovima dužine 100 km za keraunički nivo T=40 (uvaženo starenje i visinska korekcija za prosečnu nadmorsku visinu vodova od 400 m sniženjem 50% preskočnih napona izolacije za 10%), usled udara groma u vod.

Podnosivi atmosferski udarni napon izolacije	Ekvivalentna otpornost uzemljenja stuba (Ω)	Očekivani godišnji broj preskoka- $n_{g,v}$ (preskok/god.)	Očekivani godišnji broj ispada- n_i (ispad/god.)	Očekivani godišnji broj oštećenja- n_{ot} (oštećenje/god.)	Prosečan interval vremena između dva uzastopna preskoka- T_p (god.)	Prosečan interval vremena između dva uzastopna ispada- T_i (god.)	Prosečan interval vremena između dva uzastopna oštećenja T_{ot} (god.)
650 kV	1	2.1	0.21	0.021	0.48	4.8	48
	5	2.85	0.285	0.0285	0.35	3.5	35
	10	4.1	0.41	0.041	0.24	2.4	24
	20	11	1.1	0.11	0.09	0.9	9
750 kV	1	1.93	0.193	0.0193	0.52	5.2	52
	5	2.52	0.252	0.0252	0.4	4	40
	10	3.3	0.33	0.033	0.3	3	30
	20	8.7	0.87	0.087	0.11	1.1	11
850 kV	1	1.7	0.17	0.017	0.59	5.9	59
	5	2.1	0.21	0.021	0.48	4.8	48
	10	2.7	0.27	0.027	0.37	3.7	37
	20	6	0.6	0.06	0.17	1.7	17
950 kV	1	<1.7	<0.17	<0.017	>0.59	>5.9	>59
	5	1.8	0.18	0.018	0.56	5.6	56
	10	2.3	0.23	0.023	0.43	4.3	43
	20	5.3	0.53	0.053	0.19	1.9	19
1050 kV	1	<1.7	<0.17	<0.017	>0.59	>5.9	>59
	5	<1.7	<0.17	<0.017	>0.59	>5.9	>59
	10	2.1	0.21	0.021	0.48	4.8	48
	20	3.7	0.37	0.037	0.27	2.7	27

11.1.3. Koordinacija izolacije transformatorskih stanica 400 kV/220 kV, 400 kV/110 kV i 220 kV/110 kV u oblasti atmosferskih prenapona

Transformatorske stanice (TS) na otvorenom prostoru su izložene neposrednim udarima groma. One su, normalno, vrlo efikasno zaštićene štapnim gromobranima ili gromobranksim užadima, ili njihovom kombinacijom. Za TS karakteristični su pri udaru groma sledeći skupovi prenapona:

- skupovi prenapona usled udara groma u uzemljene delove TS,
- skupovi prenapona usled prodora groma kroz gromobranksu zaštitu TS i udaru u fazne provodnike,
- skupovi prenapona usled propagacije atmosferskih prenapona nadzemnim vodovima koji se susište u TS.

Navedeni skupovi prenapona se razlikuju po TS, jer one i za iste naponske nivoe nisu identične. Razlikuju se po broju vodova koji se susište u njima, po broju transformatora, po razmeštaju opreme u prostoru itd. Zbog navedenih razlika potrebno je sagledati prenapone pri udaru groma posebno u svakoj TS. Da bi se, ipak, stekla uopštena predstava o riziku preskoka u TS pri udaru groma, isti je razmatran za tipične TS: 400 kV/220 kV, 400 kV/110 kV i 220 kV/110 kV koje se nalaze u elektroenergetskom sistemu EPS u dve konfiguracije A i B. U konfiguraciji A na sabirnicama višeg i nižeg naponskog nivoa postoje po jedan nadzemni vod, a između sabirnica jedan energetska transformator; transformatorsko i dalekovodno polje su jedno pored drugog i nalaze se na sredini sabirnica. U konfiguraciji B u TS na sabirnicama 400 kV postoje 3 nadzemna voda, na sabirnicama 220 kV 4 voda i na sabirnicama 110 kV 5 vodova, a između sabirnica su dva energetska transformatora; transformatorska polja su na sredini sabirnica, a dalekovodna polja su simetrično raspodeljena sa njihove jedne i druge strane.

Rizici preskoka u TS pri udaru groma su razmatrani za različite varijante gromobrankske zaštite i različite podnosive atmosferske udarne napone izolacije.

11.1.3.1. Parametri pouzdanosti izolacije pri udaru groma u uzemljene delove TS

Skupovi prenapona pri udaru groma u uzemljene delove TS pripadaju grupi uticajnih prenapona. Ovde su razmatrani samo prenaponi pri udaru groma u portale TS koji su i najuticajniji. Utvrđeni su za svaki udar groma na izolatorskim lancima faza 0, 4 i 8 portala na isti način kao prenaponi na izolatorskim lancima nadzemnih vodova. Na osnovu krivih efekta izolatorskih lanaca, kao i za nadzemne vodove, izračunati su rizici preskoka izolatorskih lanaca faza 0, 4 i 8 portala.

Primenjeno je 1000 slučajno izabranih generatora groma u vrh portala. Srednja vrednost rizika preskoka je utvrđena sabiranjem verovatnoća preskoka za svaki udar groma i deljenjem sa brojem primenjenih udara. Slučajno izabrani generatori groma su primenjeni na portale sa dva i tri kraka u delu 110 kV TS 400 kV/110 kV i TS 220 kV/110 kV i na portale sa dva kraka u delu 400 kV u TS 400 kV/110 kV i u TS 400 kV/220 kV. Razmatrane su tri varijante gromobrankske zaštite TS:

- štapni gromobranci na portalima višeg i nižeg naponskog nivoa,
- štapni gromobranci na portalima nižeg i gromobranksa užad na portalima višeg naponskog nivoa,
- gromobranksa užad na portalima višeg i nižeg naponskog nivoa.

Otpornost uzemljenja krakova portala je menjana od 1Ω do 10Ω . Utvrđene vrednosti rizika preskoka za napred navedene varijante gromobrankske zaštite u TS i za otpornost uzemljenja krakova portala od 1 do 10Ω su date u tabelama 11.1.3.1.1., 11.1.3.1.2. i 11.1.3.1.3. Pretpostavljeno je da za udare groma u gromobranksu užad između dva portala važi isti rizik preskoka kao za udar u same portale, iako je on manji.

Za tipične TS: 400 kV/220 kV, 400 kV/110 kV i 220 kV/110 kV procenjene su ekvivalentne prihvatne površine na kojima se mogu očekivati udari groma u gromobransku zaštitu na portalima višeg i nižeg naponskog nivoa i iznose:

$S_{400}=0.08 \text{ km}^2$ za delove pod naponom 400 kV u TS 400 kV/220 kV i TS 400 kV/110 kV,

$S_{200}=0.05 \text{ km}^2$ za delove pod naponom 220 kV u TS 400 kV/220 kV i TS 220 kV/110 kV,

$S_{110}=0.03 \text{ km}^2$ za delove pod naponom 110 kV u TS 400 kV/110 kV i TS 220 kV/110 kV.

Pretpodstavljeno je da se TS nalaze na području sa 4 udara groma po 1 km^2 godišnje. Tada su godišnji brojevi udara groma u 400 kV, 220 kV i 110 kV delove TS: $n_{g,400}=0.32$, $n_{g,220}=0.2$ i $n_{g,110}=0.12$.

Na osnovu utvrđenih rizika preskoka u tabelama 11.1.3.1.1., 11.1.3.1.2. i 11.1.3.1.3. i godišnjeg broja udara groma u 400 kV, 220 kV i 110 kV delove TS izračunate su vrednosti prosečnih intervala vremena između dva uzastopna preskoka fazne izolacije u TS i date u tabelama 11.1.3.1.4., 11.1.3.1.5. i 11.1.3.1.6.

Prosečni interval vremena između dva uzastopna preskoka fazne izolacije TS zaštićene gromobranskim užadima na celoj površini je izračunat iz izraza:

$$T_p = \frac{1}{n_{g,1km^2}} \cdot \frac{1}{\frac{1}{2} S_{VN} R_{VN,2g} + \frac{1}{2} S_{VN} R_{VN,1g} + \frac{1}{2} S_{NN} R_{NN,2g} + \frac{1}{2} S_{NN} R_{NN,1g}}, \quad (11.1.3.1.1.)$$

TS zaštićene gromobranskim užadima na višenaponskoj i štapnim gromobranima na niženaponskoj strani iz izraza:

$$T_p = \frac{1}{n_{g,1km^2}} \cdot \frac{1}{\frac{1}{2} S_{VN} R_{VN,2g} + \frac{1}{2} S_{VN} R_{VN,1g} + S_{NN} R_{NN}}, \quad (11.1.3.1.2.)$$

TS zaštićene samo štapnim gromobranima iz izraza:

$$T_p = \frac{1}{n_{g,1km^2}} \cdot \frac{1}{S_{VN} R_{VN} + S_{NN} R_{NN}}. \quad (11.1.3.1.3.)$$

Ovde su:

S_{VN} - ekvivalentna prihvatna površina višenaponskog dela TS,

S_{NN} - ekvivalentna prihvatna površina niženaponskog dela TS,

$n_{g,1km^2}$ - godišnji broj udara groma na 1 km^2 ,

$R_{VN,2g}$ - rizik preskoka u višenaponskom delu TS pri udaru groma u portal sa gromobranskim užadima sa obe strane,

$R_{VN,1g}$ - rizik preskoka u višenaponskom delu TS pri udaru groma u portal sa štapnim gromobranom i gromobranskim užadima samo sa jedne strane,

R_{VN} - rizik preskoka u višenaponskom delu TS pri udaru groma u portal sa štapnim gromobranima,

$R_{NN,2g}$ - rizik preskoka u niženaponskom delu TS pri udaru groma u portal sa gromobranskim užadima sa obe strane,

$R_{NN,1g}$ - rizik preskoka u niženaponskom delu TS pri udaru groma u portal sa štapnim gromobranom i gromobranskim užadima samo sa jedne strane,

R_{NN} - rizik preskoka u niženaponskom delu TS pri udaru groma u portal sa štapnim gromobranom.

Tabela 11.1.3.1.1. Rizici preskoka na izolaciji portala 400 kV pri udaru groma u njegov vrh za različite otpornosti uzemljenja njegovih krakova, za različite varijante gromobranske zaštite i različite podnosive atmosferske udarne napone izolacije

Varijanta gromobranske zaštite	Otpornost uzemljenja kraka portala R Ω	Rizik preskoka za podnosive atmosferske udarne napone izolacije: 1050 kV, 1175 kV, 1300 kV i 1425 kV			
		1050 kV	1175 kV	1300 kV	1425 kV
Portal samo sa štapnim gromobranom	10	0.063	0.042	0.032	0.020
	5	0.045	0.028	0.021	0.012
	2	0.04	0.018	0.014	0.009
	1	0.037	0.017	0.011	0.007
Portal sa štapnim gromobranom i gromobranskim užadima sa jedne strane	10	0.03	0.01	$<10^{-3}$	$<10^{-3}$
	5	0.015	0.003	$<10^{-3}$	$<10^{-3}$
	2	0.013	0.002	$<10^{-3}$	$<10^{-3}$
	1	0.013	0.002	$<10^{-3}$	$<10^{-3}$
Portal sa gromobranskim užadima sa obe strane	10	0.015	0.004	$<10^{-3}$	$<10^{-3}$
	5	0.002	$<10^{-3}$	$<10^{-3}$	$<10^{-3}$
	2	$<10^{-3}$	$<10^{-3}$	$<10^{-3}$	$<10^{-3}$
	1	$<10^{-3}$	$<10^{-3}$	$<10^{-3}$	$<10^{-3}$

Tabela 11.1.3.1.2. Rizici preskoka na izolaciji portala 220 kV pri udaru groma u njegov vrh za različite otpornosti uzemljenja njegovih krakova, različite varijante gromobranske zaštite i različite podnosive atmosferske udarne napone izolacije

Varijanta gromobranske zaštite	Otpornost uzemljenja kraka portala R Ω	Rizik preskoka za podnosive atmosferske udarne napone izolacije: 650 kV 750 kV, 850 kV, 950 kV i 1050 kV				
		650 kV	750 kV	850 kV	950 kV	1050 kV
Portal samo sa štapnim gromobranom	10	0.15	0.085	0.040	0.025	0.015
	5	0.085	0.040	0.025	0.016	0.007
	2	0.08	0.030	0.018	0.012	0.003
	1	0.07	0.025	0.014	0.01	0.001
Portal sa štapnim gromobranom i gromobranskim užadima sa jedne strane	10	0.093	0.044	0.017	0.003	0.002
	5	0.036	0.016	0.002	$<10^{-3}$	$<10^{-3}$
	2	0.023	0.01	$<10^{-3}$	$<10^{-3}$	$<10^{-3}$
	1	0.021	0.01	$<10^{-3}$	$<10^{-3}$	$<10^{-3}$
Portal sa gromobranskim užadima sa obe strane	10	0.063	0.027	0.009	0.002	$<10^{-3}$
	5	0.024	0.002	$<10^{-3}$	$<10^{-3}$	$<10^{-3}$
	2	0.011	0.0007	$<10^{-3}$	$<10^{-3}$	$<10^{-3}$
	1	0.01	0.0005	$<10^{-3}$	$<10^{-3}$	$<10^{-3}$

Tabela 11.1.3.1.3. Rizici preskoka na izolaciji portala 110 kV pri udaru groma u njegov vrh za različite otpornosti uzemljenja njegovih krakova, različite varijante gromobranske zaštite i različite podnosive atmosferske udarne napone izolacije.

Portal	Varijante gromobranske zaštite	Otpornost uzemljenja kraka portala R Ω	Rizik preskoka za podnosive atmosferske udarne napone izolacije 450 kV i 550 kV	
			450 kV	550 kV
Portal sa dva kraka	Portal samo sa štapnim gromobranom	10	0.17	0.075
		5	0.065	0.023
		2	0.054	0.02
		1	0.05	0.018
	Portal sa štapnim gromobranom i gromobranskim užadima sa jedne strane	10	0.135	0.055
		5	0.035	0.004
		2	0.02	0.001
		1	0.018	0.001
	Portal sa gromobranskim užadima sa obe strane	10	0.08	0.03
		5	0.03	0.003
		2	0.004	$<10^{-3}$
		1	0.002	$<10^{-3}$
Portal sa tri kraka	Portal samo sa štapnim gromobranom	10	0.063	0.035
		5	0.03	0.012
		3	0.023	0.01
	Portal sa štapnim gromobranom i gromobranskim užadima sa jedne strane	10	0.05	0.02
		5	0.014	$<10^{-3}$
		3	0.006	$<10^{-3}$
	Portal sa gromobranskim užadima sa obe strane	10	0.038	0.012
		5	0.003	$<10^{-3}$
		3	0.0003	$<10^{-3}$

Tabela 11.1.3.1.4. Prosečni intervali vremena (T_p) između dva uzastopna preskoka pri udaru groma u uzemljene delove TS 400 kV/220 kV za različite varijante gromobranske zaštite, različite otpornosti uzemljenja krakova portala i različite podnosive atmosferske udarne napone izolacije

Varijanta gromobranske zaštite TS 400 kV/220 kV	Otpornost uzemljenja krakova portala R Ω	Prosečni intervali vremena (T_p) između dva uzastopna preskoka za različite podnosive atmosferske udarne napone izolacije				
		1050kV/650kV (god.)	1175kV/750kV (god.)	1300kV/850kV (god.)	1425kV/950kV (god.)	1425kV/1050kV (god.)
Štapni gromobrani na portalima 400 kV i 220 kV	10	20	33	55	88	106
	5	32	59	85	142	191
	2	35	85	124	189	287
	1	39	96	158	236	410
Štapni gromobrani na portalima 220 kV i gromobranska užad na portalima 400kV	10	27	52	>120	>188	>300
	5	51	>116	>188	>284	>580
	2	>55	>154	>255	>368	>1080
	1	>62	>182	>320	>430	>1900
Gromobranska užad na portalima 400 kV i 220 kV	10	44	107	>340	>1200	>1600
	5	115	>410	>1600	>1900	>1900
	2	>177	>645	>1900	>1900	>1900
	1	>187	>645	>1900	>1900	>1900

Tabela 11.1.3.1.5. Prosečni intervali vremena (T_p) između dva uzastopna preskoka pri udaru groma u uzemljene delove TS 400 kV/110 kV za različite varijante gromobranske zaštite, različite otpornosti uzemljenja krakova portala i različite podnosive atmosferske udarne napone izolacije

Varijanta gromobranske zaštite TS 400 kV/110 kV	Otpornost uzemljenja krakova portala R Ω	Prosečni intervali vremena (T_p) između dva uzastopna preskoka za različite podnosive atmosferske udarne napone izolacije			
		1050kV/450kV (god.)	1175kV/450kV (god.)	1300kV/550kV (god.)	1425kV/550kV (god.)
Štapni gromobrani na portalima 400 kV i 110 kV	10	23	28	49	62
	5	42	56	97	141
	2	48	77	134	177
	1	52	83	163	214
Štapni gromobrani na portalima 110 kV i gromobranska užad na portalima 400kV	10	36	44	>100	>100
	5	95	>110	>320	>320
	2	>110	>140	>360	>360
	1	>120	>150	>400	>400
Gromobranska užad na portalima 400 kV i 110 kV	10	50	66	>150	>150
	5	151	>220	>1350	>1350
	2	>270	>520	>2200	>2200
	1	>290	>590	>2200	>2200

* Pretpostavljeno je da se u 110 kV delu TS nalaze samo dvokraki portali.

Tabela 11.1.3.1.6. Prosečni intervali vremena (T_p) između dva uzastopna preskoka pri udaru groma u uzemljene delove TS 220 kV/110 kV za različite varijante gromobranske zaštite, različite otpornosti uzemljenja krakova portala i različite podnosive atmosferske udarne napone izolacije

Varijanta gromobranske zaštite TS 220 kV/110 kV	Otpornost uzemljenja krakova portala R Ω	Prosečni intervali vremena (T_p) između dva uzastopna preskoka za različite podnosive atmosferske udarne napone izolacije				
		650kV/450kV (god.)	750kV/450kV (god.)	850kV/550kV (god.)	950kV/550kV (god.)	1050kV/550kV (god.)
Štapni gromobrani na portalima 220 kV i 110 kV	10	20	27	59	71	83
	5	40	63	129	168	240
	2	44	80	167	208	333
	1	50	91	202	240	424
Štapni gromobrani na portalima 110 kV i gromobranska užad na portalima 220kV	10	28	36	86	>100	>100
	5	72	>100	>320	>330	>330
	2	>100	>130	>380	>380	>380
	1	>110	>140	>420	>420	>420
Gromobranska užad na portalima 220 kV i 110 kV	10	35	50	>110	>150	>150
	5	101	>170	>1300	>1300	>1300
	2	>200	>390	>2600	>2600	>2600
	1	>230	>440	>2600	>2600	>2600

* Pretpostavljeno je da se u 110 kV delu TS nalaze samo dvostruki portali.

11.1.3.2. Parametri pouzdanosti izolacije pri prodoru groma kroz gromobransku zaštitu TS i udaru u fazne provodnike

Dispozicija elemenata u TS određuje i njenu gromobransku zaštitu. Kada je TS na celoj površini zaštićena gromobranskim užadima praktično je onemogućen prodor groma kroz gromobransku zaštitu i udar u fazne provodnike. Štapni gromobrani, umesto gromobranskih užadi, su takođe dobra zaštita, ako se adekvatno rasporede u TS. Međutim, mogućnost prodora groma u prisustvu štapnih gromobrana je veća nego kada su prisutna gromobranska užad. Gustinom štapnih gromobrana povećava se efikasnost zaštite TS od prodora groma kroz gromobransku zaštitu. Korišćenjem elektroteometrijske metode može se utvrditi rizik direktnog udara groma u fazne provodnike prodorom groma kroz gromobransku zaštitu TS. Pošto TS nisu tipizirane, niti je tipiziran raspored štapnih gromobrana, rizik direktnog udara groma u fazni provodnik je potrebno utvrditi za svaku TS. U varijanti gromobranske zaštite sa gromobranskim užadima na celoj površini TS prodor kroz gromobransku zaštitu prema elektroteometrijskoj metodi mogu izazvati samo struje groma veoma malih amplituda, a ove ne dovode do prenapona opasnih po izolaciju TS. Na osnovu elektroteometrijske metode procenjen je rizik direktnog udara groma u fazne provodnike kada su na portalima TS prisutni štapni gromobrani. Ustanovljeno je da verovatnoća prodora groma (1000 primenjenih struja groma) može da bude i veća od 0.02 i da se pri tom može očekivati preskok na spoljašnjoj izolaciji i u 80% slučajeva. Da bi se utvrdio rizik preskoka na izolaciji TS pri prodoru groma kroz gromobransku zaštitu, u zavisnosti od podnosivih atmosferskih udarnih napona izolacije namotaja, potrebno je preciznije računati prihvatne površine faznih provodnika i gromobrana na portalima: one su ovde procenjivane u zavisnosti od amplituda struje groma. U tabeli 11.1.3.2.1. su dati prosečni intervali vremena između dva uzastopna preskoka fazne izolacije TS 400 kV/220 kV, TS 400 kV/110 kV i TS 220 kV/110 kV pri udaru groma u fazne provodnike prodorom kroz

gromobransku zaštitu. Izračunati su na osnovu očekivanih godišnjih brojeva preskoka izolacije u TS dobijenih iz sledećeg izraza:

$$T_p = \frac{I}{N_{pr.VN} + N_{pr.NN}} = \frac{1000}{n_{g,1km^2} \sum_{i=1}^{1000} (p_{pr.VN,i} S_{I.VN,i} + p_{pr.NN,i} S_{I.NN,i})} \quad (11.1.3.2.1.)$$

Ovde su:

- $N_{pr, VN}$ - očekivani godišnji broj preskoka u višenaponskom delu TS pri prodoru groma kroz gromobransku zaštitu i udaru u fazne provodnike,
- $N_{pr, NN}$ - očekivani godišnji broj preskoka u niženaponskom delu TS pri prodoru groma kroz gromobransku zaštitu i udaru u fazne provodnike,
- $p_{pr, VN, i}$ - verovatnoća preskoka na izolaciji višenaponskog dela TS pri prodoru struje groma amplitude I_i kroz gromobransku zaštitu i udaru u fazne provodnike,
- $p_{pr, NN, i}$ - verovatnoća preskoka na izolaciji niženaponskog dela TS pri prodoru struje groma amplitude I_i kroz gromobransku zaštitu i udaru u fazne provodnike,
- $S_{I, VN, i}$ - ekvivalentna prihvatna površina faznih provodnika višenaponskog dela TS, pri prodoru struje groma amplitude I_i kroz gromobransku zaštitu i udaru u fazne provodnike,
- $S_{I, NN, i}$ - ekvivalentna prihvatna površina faznih provodnika niženaponskog dela TS, pri prodoru struje groma amplitude I_i kroz gromobransku zaštitu i udaru u fazne provodnike,
- I_i - amplituda i -te struje groma u uzorku od 1000 ($i=1, \dots, 1000$) izabranih amplituda struje groma,
- $n_{g, 1km^2}$ - godišnji broj udara groma na 1 km^2 ($n_{g, 1km^2} = 4$).

Tabela 11.1.3.2.1. Prosečni intervali vremena (T_p) između dva uzastopna preskoka fazne izolacije u TS 400 kV/220 kV, 400 kV/110 kV i 220 kV/110 kV pri prodoru groma kroz gromobransku zaštitu i udaru u fazne provodnike za različite varijante gromobranske zaštite.

TS	Nazivni podnosivi atmosferski udarni naponi višeg ($U_{p,v}$) i nižeg ($U_{p,n}$) naponskog nivoa $U_{p,v}/U_{p,n}$ kV/kV	Varijanta gromobranske zaštite		
		Štapni gromobrani na portalima višeg i nižeg naponskog nivoa TS T_p (godina)	Štapni gromobrani na portalima nižeg i gromobranska užad na portalima višeg naponskog nivoa TS T_p (godina)	Gromobranska užad na portalima višeg i nižeg naponskog nivoa TS T_p (godina)
220 kV/110 kV	1050/550 950/550 850/550 750/450 650/450	>1000	>2000	>10000
400 kV/110 kV	1425/550 1300/550 1175/450 1050/450	>1000	>2000	>10000
220 kV/110 kV	1425/1050 1425/950 1300/850 1175/750 1050/650	>1000	>2000	>10000

11.1.3.3. Parametri pouzdanosti izolacije pri propagaciji atmosferskih prenapona nadzemnim vodovima koji se susiđu u TS

Posmatrane su dve karakteristične konfiguracije A i B u TS 400 kV/220 kV, TS 400 kV/110 kV i 220 kV/110 kV u kojima je razmatran rizik preskoka fazne izolacije pri propagaciji atmosferskih prenapona nadzemnim vodovima 400 kV, 220 kV i 110 kV. U konfiguraciji A u TS su na sabirnicama višeg i nižeg napona prisutni po jedan nadzemni vod, a između sabirnica jedan energetski transformator. U konfiguraciji B u TS su na sabirnicama 400 kV prisutna 3 nadzemna voda, na sabirnicama 220 kV 4 nadzemna voda i na sabirnicama 110 kV 5 nadzemnih vodova, a između sabirnica dva transformatora. Ova konfiguracija se često sreće u TS i vremenski je najduže prisutna u toku godine. Za rastojanje prvog stuba voda od TS je usvojeno 100 m za nadzemne vodove 110 kV i 200 m za nadzemne vodove 220 kV i 400 kV. Primenjeno je po 1000 udara groma u prvih nekoliko stubova i u gromobransku užad nadzemnih vodova 400 kV, 220 kV i 110 kV koji se susiđu u TS kada je TS u konfiguraciji A i kada je u konfiguraciji B. Usvojeno je da je ekvivalentna otpornost uzemljenja stubova 10Ω i da je otpornost uzemljenja kraka portala u TS 10Ω . U svim ovim slučajevima ustanovljeni su naponi na izolaciji TS. Na osnovu njih su utvrđene verovatnoće preskoka fazne izolacije za svaki udar groma, a na osnovu ovih rizici preskoka i kao poslednji prosečni intervali vremena između dva uzastopna preskoka fazne izolacije TS.

Rizici preskoka su ustanovljeni za udare groma u stubove voda i za udare groma u gromobransku užad i fazne provodnike na rasponu između stubova. Prosečni intervali vremena između dva uzastopna preskoka izolacije u TS su ustanovljeni iz izraza:

$$T_p = \frac{1}{n_{n,1km^2} \sum_j \sum_i (S_{i,j,s} R_{i,j,s} + S_{i,j,gu} R_{i,j,gu} + S_{i,j,f} R_{i,j,f})} \quad (11.1.3.3.1.)$$

Ovde su:

$R_{i,j,s}$ - rizik preskoka fazne izolacije u TS pri udaru groma u i-ti stub j-tog voda,

$R_{i,j,gu}$ - rizik preskoka fazne izolacije u TS pri udaru groma u gromobransku užad i-tog raspona j-tog voda,

$R_{i,j,f}$ - rizik preskoka fazne izolacije u TS pri prodoru groma kroz gromobransku zaštitu i-tog raspona j-tog voda i udaru u fazne provodnike,

$S_{i,j,s}$ - ekvivalentna prihvatna površina i-tog stuba j-tog voda,

$S_{i,j,gu}$ - ekvivalentna prihvatna površina gromobranskih užadi i-tog raspona j-tog voda,

$S_{i,j,f}$ - ekvivalentna prihvatna površina faznih provodnika i-tog raspona j-tog voda,

$n_{n,1km^2}$ - godišnji broj udara groma na 1 km^2 ($n_{n,1km^2} = 4$).

Rizici preskoka fazne izolacije u TS $R_{i,j,s}$, $R_{i,j,r}$ i $R_{i,j,f}$ su utvrđeni iz sledećih izraza:

$$R_{i,j,s} = \frac{1}{N - N_{pr}} \sum_{q=1}^N \left[1 - \prod_{m=1}^M (1 - P_{s,q,m}) \right], \quad (11.1.3.3.2.)$$

$$R_{i,j,gu} = \frac{1}{N - N_{pr}} \sum_{q=1}^N \left[1 - \prod_{m=1}^M (1 - P_{gu,q,m}) \right] \text{ i} \quad (11.1.3.3.3.)$$

$$R_{i,j,f} = \frac{1}{N} \sum_{q=1}^{N_{pr}} \left[1 - \prod_{m=1}^M (1 - P_{f,q,m}) \right]. \quad (11.1.3.3.4.)$$

Ovde su:

- $P_{s,q,m}$ - verovatnoća preskoka na m-toj faznoj izolaciji u TS pri q -tom udaru groma u i-ti stub j-tog voda,
- $P_{gu,q,m}$ - verovatnoća preskoka na m-toj faznoj izolaciji u TS pri q -tom udaru groma u gromobransku užad i-tog raspona j-tog voda,
- $P_{f,q,m}$ - verovatnoća preskoka na m-toj faznoj izolaciji u TS pri q -tom prodoru groma kroz gromobransku zaštitu i udaru u fazne provodnike i-tog raspona j-tog voda,
- N - broj primenjenih udara groma ($N=1000$),
- N_{pr} - broj prodora groma kroz gromobransku zaštitu i udaru u fazne provodnike,
- M - broj izolacija u TS izloženih prenaponima pri propagaciji atmosferskih prenapona vodovima u TS.

Ustanovljeno je da su rizici preskoka fazne izolacije u TS pri udaru groma u vod od četvrtog stuba od TS na dalje mali u odnosu na rizike pri udaru groma u vod bliže TS i da se mogu zanemariti. U tabelama 11.1.3.3.1. i 11.1.3.3.2. su dati prosečni intervali vremena između dva uzastopna preskoka fazne izolacije u TS u konfiguracijama A i B pri udaru groma u vodove koji se susište u TS.

Tabela 11.1.3.3.1. Prosečni intervali vremena (T_p) između dva uzastopna preskoka fazne izolacije u TS 400 kV/220 kV, TS 400 kV/110 kV i TS 220 kV/110 kV pri propagaciji atmosferskih prenapona nadzemnim vodovima 400 kV, 220 kV i 110 kV u konfiguraciji A TS sa različitim varijantama gromobranske zaštite.

TS kV/kV	Nadzemni vodovi koji se susište na sabirnicama TS	Nazivni podnosivi atmosferski udarni naponi višeg ($U_{p,v}$) i nižeg ($U_{p,n}$) naponskog nivoa TS $U_{p,v}/U_{p,n}$ kV/kV	Prosečni intervali vremena (T_p) između dva uzastopna preskoka fazne izolacije u TS sa različitim varijantama gromobranske zaštite		
			Štapni gromobrani na portalima TS (god)	Štapni gromobrani na portalima niženaponskog nivoa i gromobranska užad na portalima višenaponskog nivoa TS (god)	Gromobranska užad na portalima TS (god)
220/110	Vodovi 220 kV i 110 kV sa portalnim stubovima	1050/550	>140	>140	>160
		950/550	>50	>50	>60
		850/550	>30	>30	>40
		750/450	>30	>30	>40
	Vodovi 220 kV sa portalnim stubovima i 110 kV sa stubovima jela	1050/550	>80	>80	>100
		950/550 850/550	>30	>30	>40
400/110	Vodovi 400 kV i 110 kV sa portalnim stubovima	1425/550	>140	>140	>160
		1300/550	>50	>50	>60
	Vodovi 400 kV sa portalnim stubovima i 110kV sa stubovima jela	1175/450	>80	>80	>100
		1050/450	>30	>30	>40
400/220	Vodovi 400 kV sa portalnim ili Y stubovima i 220kV sa portalnim stubovima	1425/1050	>200	>200	>200
		1425/950	>90	>90	>100
		1300/850			
		1175/750			

Tabela 11.1.3.3.2. Prosečni intervali vremena (T_p) između dva uzastopna preskoka fazne izolacije u TS 400 kV/220 kV, TS 400 kV/110 kV i TS 220 kV/110 kV pri propagaciji atmosferskih prenapona nadzemnim vodovima 400 kV, 220 kV i 110 kV u konfiguraciji B TS sa različitim varijantama gromobranske zaštite.

TS kV/kV	Nadzemni vodovi koji se susreću na sabirnicama TS	Nazivni podnosivi atmosferski udarni naponi višeg ($U_{p,V}$) i nižeg ($U_{p,N}$) naponskog nivoa TS $U_{p,V}/U_{p,N}$ kV/kV	Prosečni intervali vremena (T_p) između dva uzastopna preskoka fazne izolacije u TS sa različitim varijantama gromobranske zaštite		
			Štapni gromobrani na portalima TS (god)	Štapni gromobrani na portalima niženaponskog nivoa i gromobranska užad na portalima višenaponskog nivoa TS (god)	Gromobranska užad na portalima TS (god)
220/110	Vodovi 220 kV i 110 kV sa portalnim stubovima	1050/550	>45	>45	>50
		950/550			
		850/550			
		750/450	>25	>25	>30
	650/450	>17	>17	>20	
	Vodovi 220 kV sa portalnim stubovima i 110 kV sa stubovima jela	1050/550	>35	>35	>40
950/550					
850/550					
400/110	Vodovi 400 kV i 110 kV sa portalnim stubovima	1425/550	>50	>50	>60
		1300/550			
		1175/450	>30	>30	>40
	Vodovi 400 kV sa portalnim stubovima i 110kV sa stubovima jela	1050/450			
		1425/550	>40	>40	>45
		1300/550			
400/220	Vodovi 400 kV sa portalnim ili Y stubovima i 220kV sa portalnim stubovima	1175/450	>20	>20	>25
		1050/450			
		1425/1050			
		1425/950	>100	>100	>100
		1300/850			
		1175/750			
		1050/650	>60	>60	>70

11.1.3.4. Parametri pouzdanosti izolacije TS pri ukupnom delovanju atmosferskih prenapona

Preskok na izolaciji TS pri delovanju atmosferskih prenapona predstavlja istovremeno i ispad TS iz pogona. Izolacije u poljima nadzemnih vodova do strujnog transformatora pripadaju nadzemnom vodu, iako se nalaze u TS. Preskok na njima ne dovodi do ispada TS već ispada samo nadzemni vod iz pogona, ili ostaje u pogonu posle delovanja zaštite automatskim ponovnim uključenjem.

Na osnovu prosečnih intervala vremena između dva uzastopna preskoka fazne (T_p) izolacije u TS 400 kV/220 kV, TS 400 kV/110 kV i TS 220 kV/110 kV, utvrđenih za svaki (i-ti) karakteristični skup atmosferskih prenapona, datih u tabelama: 11.1.3.1.4., 11.1.3.1.5., 11.1.3.1.6., 11.1.3.2.1., 11.1.3.3.1. i 11.1.3.3.2., izračunati su očekivani godišnji brojevi ispada (N_i) i prosečni intervali

vremena između dva uzastopna ispada (T_i) TS za celokupno delovanje atmosferskih prenapona na faznu izolaciju TS iz sledećih izraza:

$$N_i = \sum_i \frac{1}{T_{p,i}} \quad (11.1.3.4.1.)$$

$$T_i = \frac{1}{N_i} = \frac{1}{\sum_i \frac{1}{T_{p,i}}} \quad (11.1.3.4.2.)$$

$T_{p,i}$ - prosečni interval vremena između dva uzastopna preskoka fazne izolacije u TS pri delovanju prenapona iz i-tog skupa.

Pod pretpostavkom da pri svakom desetom ispadu dolazi do oštećenja izolacije izračunati su očekivani godišnji brojevi oštećenja (N_{ot}) i prosečni intervali vremena između dva uzastopna oštećenja (T_{ot}) iz izraza:

$$N_{ot} = 0.1 N_i \quad (11.1.3.4.3.)$$

$$T_{ot} = 10 T_i \quad (11.1.3.4.4.)$$

Prosečni intervali vremena između dva uzastopna ispada i oštećenja u TS u konfiguracijama A i B su dati u tabelama 11.1.3.4.1. i 11.1.3.4.2. za otpornosti uzemljenja krakova portala u TS $R=10 \Omega$.

Vrednosti parametara pouzdanosti date u tabelama 11.1.3.4.1. i 11.1.3.4.2. su utvrđene za izolacije u TS čiji preskočni naponi ostaju isti u celom životnom veku. Uzimajući u obzir koeficijent sigurnosti, koji obuhvata starenje i druge nepoznate faktore koji dovode do spuštavanja podnosivih napona izolacije, i koeficijent visinske korekcije za prosečnu nadmorsku visinu TS od 400 m, vrednosti parametara krivih efekta, datih u tabeli 11.1.1.4., se smanjuju za 10%. Za iste su ustanovljeni prosečni intervali vremena između dva uzastopna ispada i oštećenja u TS u konfiguracijama A i B. Izračunate vrednosti su bile manje, ali ne ispod 80% vrednosti prosečnih intervala vremena između dva uzastopna ispada i oštećenja datih u tabelama 11.1.3.4.1. i 11.1.3.4.2.

Tabela 11.1.3.4.1. Prosečni intervali vremena između dva uzastopna ispada (T_i) i oštećenja (T_{ot}) spoljašnje izolacije u TS 400 kV/220 kV, TS 400 kV/110 kV i TS 220 kV/110 kV u konfiguraciji A sa različitim varijantama gromobranske zaštite uslovljeni svim atmosferskim prenaponima.

TS kV/kV	Nadzemni vodovi koji se susište na sabirnicama TS	Nazivni podnosivi atmosferski udarni naponi višeg ($U_{p,V}$) i nižeg ($U_{p,N}$) naponskog nivoa TS $U_{p,V}/U_{p,N}$ kV/kV	Prosečni intervali vremena između dva uzastopna ispada (T_i) i oštećenja (T_{ot}) TS sa različitim varijantama gromobranske zaštite					
			Štapni gromobrani na portalima TS		Štapni gromobrani na portalima niženaponskog nivoa i gromobranska užad na portalima višenaponskog nivoa TS		Gromobranska užad na portalima TS	
			T_i (god)	T_{ot} (god.)	T_i (god)	T_{ot} (god.)	T_i (god)	T_{ot} (god.)
220/110	Vodovi 220 kV i 110 kV sa portalnim stubovima	1050/550	>50	>500	>55	>550	>70	>700
		950/550	>45	>450	>55	>550	>70	>700
		850/550	>40	>400	>50	>500	>60	>600
		750/450	>17	>170	>20	>200	>25	>250
		650/450	>11	>110	>14	>140	>18	>180
	Vodovi 220 kV sa portalnim stubovima i 110 kV sa stubovima jela	1050/550	>35	>350	>40	>400	>60	>600
		950/550	>35	>350	>40	>400	>60	>600
		850/550	>30	>300	>40	>400	>50	>500
		750/450	>14	>140	>16	>160	>20	>200
		650/450	>9	>90	>11	>110	>16	>160
400/110	Vodovi 400 kV i 110 kV sa portalnim stubovima	1425/550	>40	>400	>50	>500	>70	>700
		1300/550	>35	>350	>50	>500	>70	>700
		1175/450	>17	>170	>20	>200	>30	>300
		1050/450	>15	>150	>18	>180	>25	>250
	Vodovi 400 kV sa portalnim stubovima i 110kV sa stubovima jela	1425/550	>30	>300	>40	>400	>60	>600
		1300/550	>25	>250	>40	>400	>60	>600
		1175/450	>14	>140	>17	>170	>25	>250
		1050/450	>12	>120	>16	>160	>20	>200
400/220	Vodovi 400 kV sa portalnim ili Y stubovima i 220kV sa portalnim stubovima	1425/1050	>60	>600	>100	>1000	>180	>1800
		1425/950	>50	>500	>90	>900	>170	>1700
		1300/850	>40	>400	>70	>700	>120	>1200
		1175/750	>25	>250	>40	>400	>60	>600
		1050/650	>16	>160	>20	>200	>30	>300

Tabela 11.1.3.4.2. Prosečni intervali vremena između dva uzastopna ispada (T_i) i oštećenja (T_{ot}) spoljašnje izolacije u TS 400 kV/220 kV, TS 400 kV/110 kV i TS 220 kV/110 kV u konfiguraciji B sa različitim varijantama gromobranske zaštite uslovljeni svim atmosferskim prenaponima.

TS kV/kV	Nadzemni vodovi koji se susište na sabirnicama TS	Nazivni podnosivi atmosferski udarni naponi višeg ($U_{p,v}$) i nižeg ($U_{p,N}$) naponskog nivoa TS $U_{p,v}/U_{p,N}$ kV/kV	Prosečni intervali vremena između dva uzastopna ispada (T_i) i oštećenja (T_{ot}) TS sa različitim varijantama gromobranske zaštite					
			Štapni gromobrani na portalima TS		Štapni gromobrani na portalima niženaponskog nivoa i gromobranska užad na portalima višenaponskog nivoa TS		Gromobranska užad na portalima TS	
			T_i (god.)	T_{ot} (god.)	T_i (god.)	T_{ot} (god.)	T_i (god.)	T_{ot} (god.)
220/110	Vodovi 220 kV i 110 kV sa portalnim stubovima	1050/550	>25	>250	>30	>300	>35	>350
		950/550	>25	>250	>30	>300	>35	>350
		850/550	>20	>200	>25	>250	>32	>320
		750/450	>12	>120	>14	>140	>18	>180
		650/450	>9	>90	>10	>100	>12	>120
	Vodovi 220 kV sa portalnim stubovima i 110 kV sa stubovima jela	1050/550	>20	>200	>25	>250	>30	>300
		950/550	>20	>200	>25	>250	>30	>300
		850/550	>20	>200	>20	>200	>28	>280
		750/450	>10	>100	>11	>110	>14	>140
		650/450	>7	>70	>8	>80	>10	>100
400/110	Vodovi 400 kV i 110 kV sa portalnim stubovima	1425/550	>25	>250	>30	>300	>40	>400
		1300/550	>20	>200	>30	>300	>40	>400
		1175/450	>14	>140	>17	>170	>20	>200
		1050/450	>12	>120	>14	>140	>20	>200
	Vodovi 400 kV sa portalnim stubovima i 110kV sa stubovima jela	1425/550	>20	>200	>25	>250	>30	>300
		1300/550	>20	>200	>25	>250	>30	>300
		1175/450	>11	>110	>13	>130	>18	>180
		1050/450	>10	>100	>12	>120	>16	>160
400/220	Vodovi 400 kV sa portalnim ili Y stubovima i 220kV sa portalnim stubovima	1425/1050	>45	>450	>70	>700	>90	>900
		1425/950	>40	>400	>60	>600	>90	>900
		1300/850	>30	>300	>50	>500	>70	>700
		1175/750	>20	>200	>30	>300	>50	>500
		1050/650	>14	>140	>18	>180	>25	>250

11.1.4. Koordinacija izolacije energetskih transformatora 400 kV/220 kV, 400 kV/110 kV i 220 kV/110 kV u oblasti atmosferskih prenapona

Energetski transformatori su ključni elementi transformatorskih stanica (TS) visokih napona. Kao i ostala oprema u TS, oni su izloženi naprezanjima usled prenapona atmosferskog porekla. Ova naprezanja su znatna i mogu da dovedu do oštećenja njihove izolacije. Da bi se efekat dejstva prenapona ublažio, energetski transformatori se štite gromobranskom i prenaponskom zaštitom. Gromobransku zaštitu predstavljaju štapni gromobrani i gromobranska užad na portalima kao i ostali visoki uzemljeni metalni elementi u TS, a prenaponsku zaštitu odvodnici prenapona. Odvodnici prenapona se po pravilu postavljaju što bliže transformatoru i vodi se računa da se obezbedi što je moguće kraća putanja po faznom provodniku između provodnih izolatora transformatora i odvodnika prenapona, kao i što kraći provodnici za uzemljenje između mase transformatora i odvodnika prenapona. Na taj način se povećava efikasnost zaštite odvodnikom prenapona i smanjuje verovatnoća proboja izolacije namotaja transformatora za prenaponske talase velikih strmina, koji se mogu pojaviti pri atmosferskim pražnjenjima.

Energetski transformatori velikih snaga smešteni su u TS visokih napona najčešće ispod portala. Portali su sa gromobranskim užadima sa obe strane, ili sa štapnim gromobranima i gromobranskim užadima samo sa jedne strane, ili samo sa štapnim gromobranima. Prvo rešenje je najpovoljnije za zaštitu transformatora i ostale opreme koja se nalazi ispod gromobranskih užadi u njihovoj zaštitnoj zoni. Fazne provodnike transformatorskog polja nose izolatorski lanci pričvršćeni za portal iznad transformatora, odakle se spuštaju do provodnih izolatora transformatora. Odvodnici prenapona su vezani ili za fazne provodnike do izolatorskih lanaca portala (sl. 11.1.4.1), ili za fazne provodnike iza izolatorskih lanaca portala na spustu prema provodnim izolatorima transformatora (sl. 11.1.4.2).

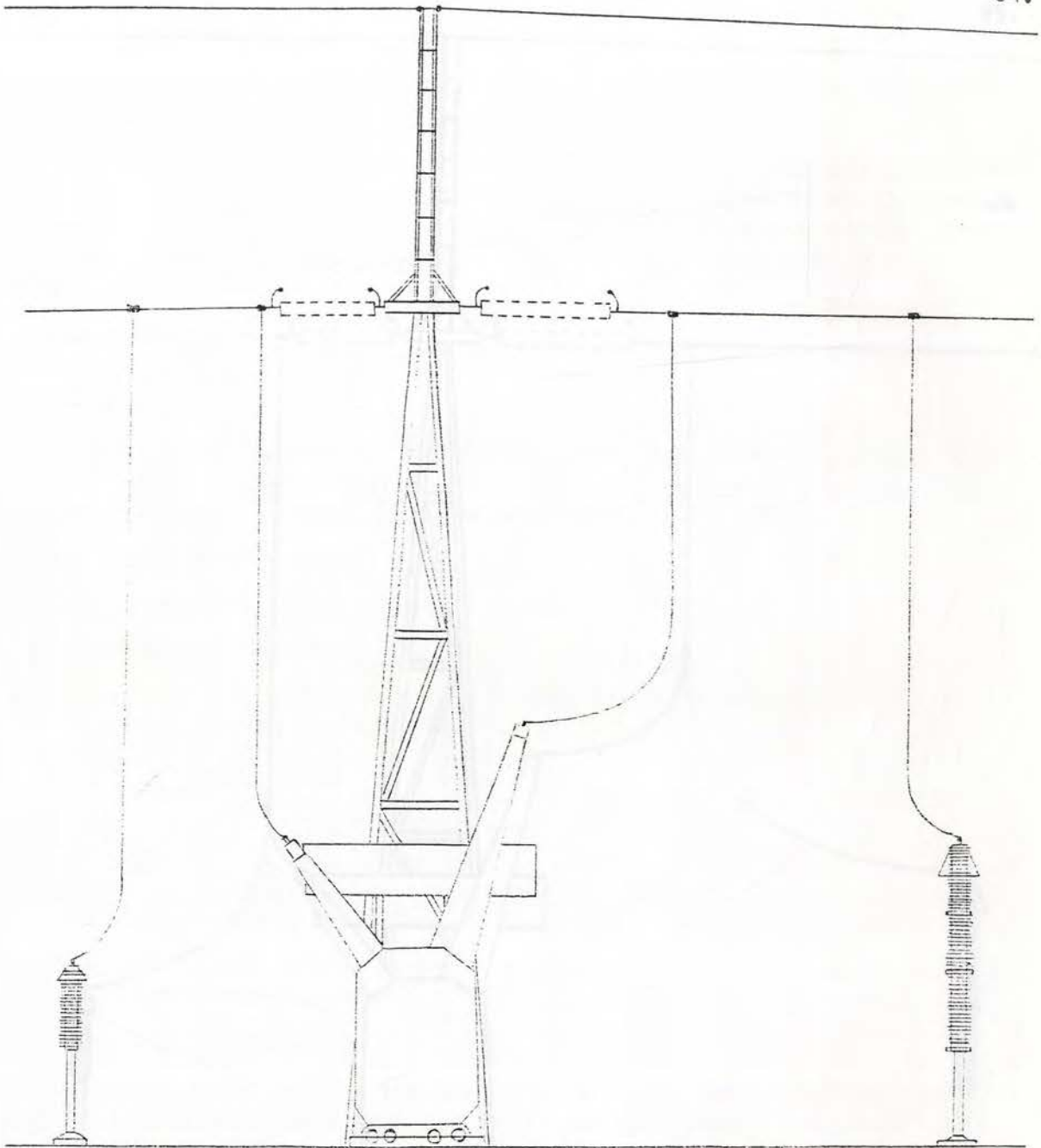
Transformatori su usled udara groma izloženi delovanju sledećih karakterističnih skupova prenapona:

- skupu prenapona pri udaru groma u portal iznad transformatora,
- skupu prenapona pri udaru groma u uzemljene delove TS,
- skupu prenapona pri prodoru groma kroz gromobransku zaštitu TS i udaru u fazne provodnike,
- skupu prenapona usled propagacije atmosferskih prenapona nadzemnim vodovima koji se susreću u TS.

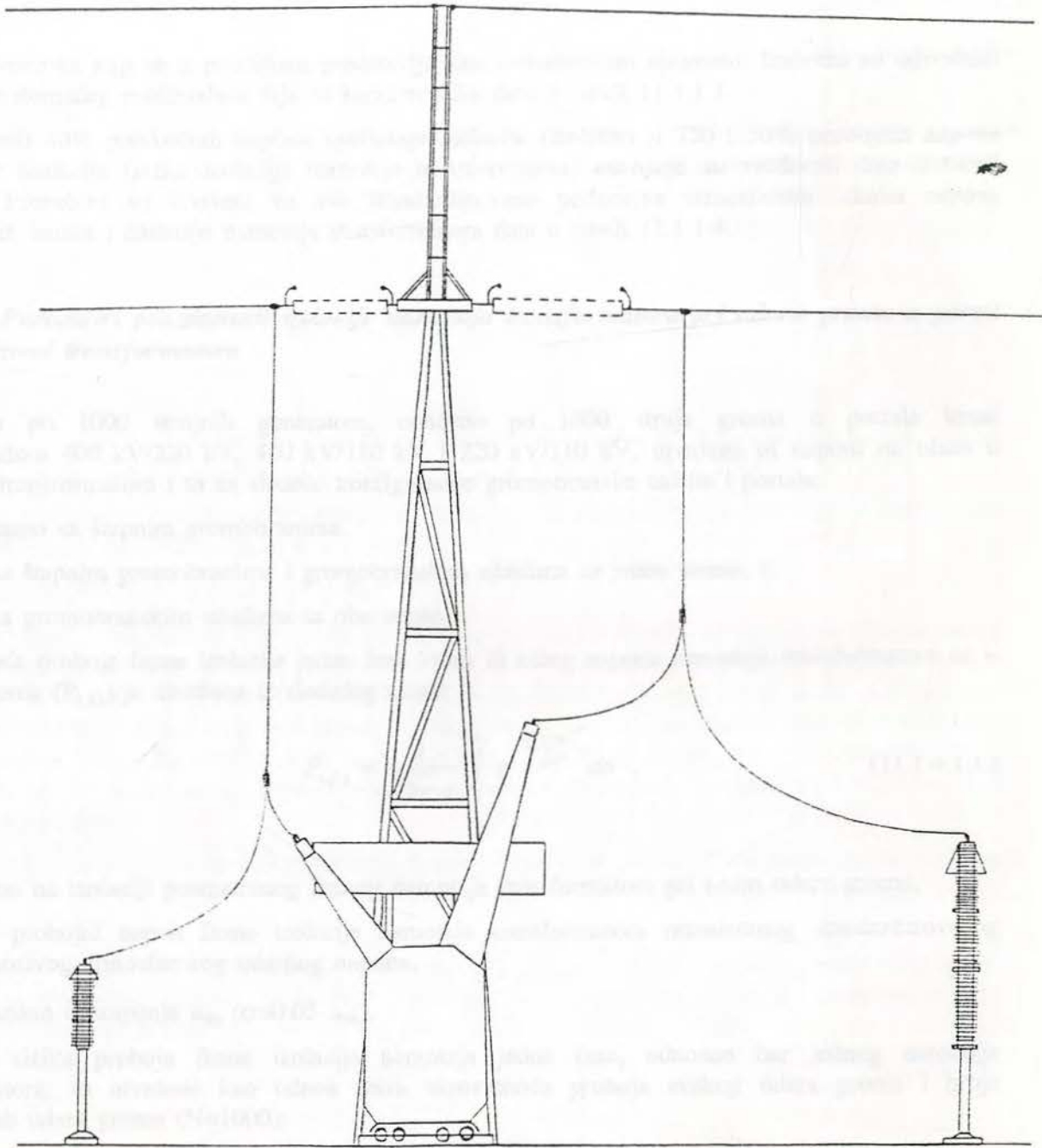
Ugroženost izolacije namotaja energetskih transformatora, pri delovanju napred navedenih skupova prenapona, je razmatrana za transformatore odnosa transformacije: 400 kV/220 kV, 400 kV/110 kV i 220 kV/110 kV. Posmatrani su naponi na priključcima transformatora za sledeće varijante gromobranske zaštite TS, odnosno za sledeće strukture (konfiguracije) gromobranske zaštite i portala u TS:

- portali sa štapnim gromobranima na celoj površini TS,
- portali niženaponskog nivoa TS sa štapnim gromobranima i portali višenaponskog nivoa TS sa gromobranskim užadima,
- portali sa gromobranskim užadima na celoj površini TS.

Razmatranje je izvršeno sa i bez prisustva prenaponske zaštite transformatora. Nju čine odvodnici prenapona sa ili bez iskrišta. Isti su uključeni u razmatranje i to za oba načina njihovog priključenja prema sl. 11.1.4.1. i sl. 11.1.4.2. (duže i kraće rastojanje po faznom provodniku između odvodnika prenapona i transformatora). Dužine faznih provodnika između odvodnika prenapona i provodnih izolatora transformatora za duža rastojanja su 30 m na strani 400 kV, 30 m na strani 220 kV i 25 m na strani 110 kV, a za kraća rastojanja iznose respektivno: 15 m, 9 m i 8 m. U proračunu su na nivoima 400 kV, 220 kV i 110 kV korišćene respektivno sledeće dužine zemljovoda odvodnika prenapona: 6 m, 5 m i 4 m; veće su od stvarnih jer je u njih uključena i



Sl. 11.1.4.1. Šematski prikaz veze odvodnika prenapona i transformatora (duži put po faznom provodniku od odvodnika prenapona do transformatora)



Sl. 11.1.4.2. Šematski prikaz veze odvodnika prenapona i transformatora (kraći put po faznom provodniku od odvodnika prenapona do transformatora)

Opis:

R_{12} - čvrst postolja jedne izolacije jedne faze visokog napona (npr. 110 kV) transformatora.

R_{13} - čvrst postolja druge izolacije na jednoj strani transformatora.

R_{14} - nezavršena postolja druge izolacije jedne faze visokog napona (npr. 110 kV) transformatora, pri čemu odnosi grane.

R_{21}, R_{22}, R_{23} - nezavršena postolja čvrst 0,4 i 1 izolacije visokog napona transformatora, pri čemu odnosi grane.

visina odvodnika koji se u proračunu predstavlja kao koncentrisani elemenat. Izabrani su odvodnici prenapona domaćeg proizvođača čije su karakteristike date u tabeli 11.1.1.3.

Za vrednosti 50% preskočnih napona spoljašnje izolacije (izolatori u TS) i 50% probojnih napona unutrašnje izolacije (fazna izolacija namotaja transformatora) ~~razvojene~~ su vrednosti date u tabeli 11.1.1.4. Proračuni su izvršeni za sve standardizovane podnosive atmosferske udarne napone izolatorskih lanaca i izolacije namotaja transformatora date u tabeli 11.1.1.4.

11.1.4.1. Parametri pouzdanosti izolacije namotaja transformatora pri udaru groma u portal iznad transformatora

Primenom po 1000 strujnih generatora, odnosno po 1000 struja groma u portale iznad transformatora 400 kV/220 kV, 400 kV/110 kV i 220 kV/110 kV, utvrđeni su naponi na ulazu u namotaje transformatora i to za sledeće konfiguracije gromobranske zaštite i portala:

- portali samo sa štapnim gromobranima,
- portali sa štapnim gromobranima i gromobranskim užadima sa jedne strane, i
- portali sa gromobranskim užadima sa obe strane.

Verovatnoća proboja fazne izolacije jedne faze višeg ili nižeg napona namotaja transformatora za i-ti udar groma ($P_{1,f,i}$) je utvrđena iz sledećeg izraza:

$$P_{1,f,i} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \int_0^{u_{pr,i}} e^{-\frac{(u-u_{50})^2}{2\sigma^2}} du \quad (11.1.4.1.1)$$

Ovde su:

$u_{pr,i}$ - napon na izolaciji posmatranog faznog namotaja transformatora pri i-tom udaru groma,

u_{50} - 50% probojni napon fazne izolacije namotaja transformatora razmatranog standardizovanog podnosivog atmosferskog udarnog napona,

σ - standardno odstupanje u_{50} ($\sigma=0.05 u_{50}$).

Vrednosti rizika proboja fazne izolacije namotaja jedne faze, odnosno bar jednog namotaja transformatora, su utvrđene kao odnos zbira verovatnoća proboja svakog udara groma i broja primenjenih udara groma ($N=1000$):

$$R_{1,f} = \frac{\sum_{i=1}^N P_{1,f,i}}{N} \quad (11.1.4.1.2)$$

$$R_f = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left[1 - (1 - P_{V,0,i})(1 - P_{V,4,i})(1 - P_{V,8,i})(1 - P_{N,0,i})(1 - P_{N,4,i})(1 - P_{N,8,i}) \right] \quad (11.1.4.1.3)$$

Ovde su:

$R_{1,f}$ - rizik proboja fazne izolacije jedne faze višeg ili nižeg napona namotaja transformatora,

R_f - rizik proboja fazne izolacije bar jednog namotaja transformatora,

$P_{1,f,i}$ - verovatnoća proboja fazne izolacije jedne faze višeg ili nižeg napona namotaja transformatora pri i-tom udaru groma,

$P_{V,0,i}$, $P_{V,4,i}$, $P_{V,8,i}$ - verovatnoće proboja faza 0, 4 i 8 namotaja višeg napona transformatora pri i-tom udaru groma,

$P_{N,0,i}$, $P_{N,4,i}$, $P_{N,8,i}$ - verovatnoće proboja faza 0,4 i 8 namotaja nižeg napona transformatora pri i-tom udaru groma.

Preskokom na izolatorskim lancima portala iznad transformatora u namotaje transformatora ulaze veoma strmi naponski talasi koji pored fazne izolacije znatno naprežu podužnu (longitudinalnu) izolaciju namotaja. Rizik proboja podužne izolacije bar jednog namotaja transformatora (R_{pod}), smatrajući da svaki preskok na izolatorskim lancima portala iznad transformatora dovodi do proboja podužne izolacije, je utvrđen iz sledećeg izraza:

$$R_{lanca} = R_{pod} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left[1 - (1 - P_{V,0,i})(1 - P_{V,4,i})(1 - P_{V,8,i})(1 - P_{N,0,i})(1 - P_{N,4,i})(1 - P_{N,8,i}) \right] \quad (11.1.4.1.4.)$$

Ovde su:

$P_{V,0,i}$, $P_{V,4,i}$, $P_{V,8,i}$ - verovatnoće preskoka izolatorskih lanaca višeg napona portala iznad transformatora pri i-tom udaru groma u portal,

$P_{N,0,i}$, $P_{N,4,i}$, $P_{N,8,i}$ - verovatnoće preskoka izolatorskih lanaca nižeg napona portala iznad transformatora pri i-tom udaru groma u portal,

N - broj primenjenih udara groma ($N=1000$).

U tabeli 11.1.4.1.1. su dati utvrđeni rizici proboja fazne i podužne izolacije namotaja transformatora 400 kV/220 kV, 400 kV/110 kV i 220 kV/110 kV za sve razmatrane varijante zaštite i sprege standardizovanih podnosivih atmosferskih udarnih napona izolacije višeg i nižeg nivoa, kao i za dva načina priključenja odvodnika prenapona sa kraćim i dužim rastojanjem od transformatora (sl. 11.1.4.1. i 11.1.4.2). Pošto su se utvrđeni rizici u prisustvu odvodnika sa iskrištem malo razlikovali od rizika u prisustvu metaloksidnih odvodnika prenapona, u tabeli 11.1.4.1.1. su dati rizici za ove poslednje.

U tabeli 11.1.4.1.2. su dati rizici proboja fazne i podužne izolacije namotaja transformatora 400 kV/220 kV, 400 kV/110 kV i 220 kV/110 kV nezaštićenih odvodnicima prenapona za sve razmatrane varijante gromobranske zaštite.

Očekivani godišnji brojevi proboja fazne (N_f) i podužne (N_{pod}) izolacije i prosečni intervali vremena između dva uzastopna proboja fazne (T_f) i podužne (T_{pod}) izolacije namotaja transformatora su izračunati iz sledećih izraza:

$$N_f = R_f \cdot n_{g,p} \quad (11.1.4.1.5.)$$

$$N_{pod} = R_{pod} \cdot n_{g,p} \quad (11.1.4.1.6.)$$

$$T_f = \frac{1}{N_f} = \frac{1}{R_f \cdot n_{g,p}} \quad (11.1.4.1.7.)$$

$$T_{pod} = \frac{1}{N_{pod}} = \frac{1}{R_{pod} \cdot n_{g,p}} \quad (11.1.4.1.8.)$$

$n_{g,p}$ - godišnji broj udara groma u portal iznad transformatora.

Portal iznad transformatora često se nalazi između dva dela TS, jednog sa višim i drugog sa nižim naponskim nivoom. Za tipične TS procenjene su ekvivalentne prihvatne površine, koristeći IEC 1024-1-1:1993, na kojima se mogu očekivati udari groma u portal iznad transformatora i iznose:

$S=0.003 \text{ km}^2$ za portal iznad transformatora 400 kV/220 kV i 400 kV/110 kV,

$S=0.001 \text{ km}^2$ za portal iznad transformatora 220 kV/110 kV.

Ako se pretpostavi da se TS nalazi na području sa 4 udara groma godišnje po 1 km^2 , godišnji broj udara groma u portal iznad transformatora 400 kV/220 kV i 400 kV/110 kV iznosi $n_{g,p}=0.012$ i u portal iznad transformatora 220 kV/110 kV $n_{g,p}=0.004$.

Na osnovu utvrđenih rizika proboja fazne izolacije namotaja transformatora i godišnjih brojeva udara groma u portal iznad transformatora, utvrđeni su očekivani godišnji brojevi proboja i prosečni intervali vremena između dva uzastopna proboja fazne izolacije namotaja transformatora 400 kV/220 kV, 400 kV/110 kV i 220 kV/110 kV pomoću izraza (11.1.4.1.5) i (11.1.4.1.7) za sve razmatrane varijante zaštite i sprege standardizovanih podnosivih atmosferskih udarnih napona izolacije višeg i nižeg nivoa; prosečni intervali vremena između dva uzastopna proboja su dati u tabeli 11.1.4.1.3. U tabeli 11.1.4.1.4 su dati prosečni intervali vremena između dva uzastopna proboja fazne izolacije namotaja transformatora 400 kV/220 kV, 400 kV/110 kV i 220 kV/110 kV nezaštićenih odvodnicima prenapona za sve razmatrane varijante gromobranske zaštite i sprege standardizovanih atmosferskih podnosivih napona izolacije.

Na portalu iznad transformatora postavljeni su izolatorski lanci višeg i nižeg naponskog nivoa. Preskoci pri udaru groma u gromobransku zaštitu na portalu nastaju na izolatorskim lancima nižeg naponskog nivoa, a kada su struje groma znatne i na izolatorskim lancima višeg naponskog nivoa. Povišenjem podnosivih atmosferskih udarnih napona izolatorskih lanaca nižeg naponskog nivoa broj povratnih preskoka na njima se smanjuje, a time i rizik proboja fazne i podužne izolacije namotaja transformatora. To je utvrđeno istraživanjima čiji su rezultati dati u tabeli 11.1.4.1.5. U istoj su date vrednosti rizika proboja fazne (R_f) i podužne (R_{pod}) izolacije namotaja transformatora 220 kV/110 kV, 400 kV/220 kV i 400 kV/110 kV, zaštićenih metaloksidnim odvodnicima prenapona (kraće rastojanje odvodnik - transformator po faznom provodniku sl.11.1.4.2.), pri udaru groma u portal iznad transformatora za različite varijante gromobranske zaštite; podnosivi atmosferski udarni naponi svih izolatorskih lanaca portala iznad transformatora izjednačeni su sa podnosivim atmosferskim udarnim naponima izolacije namotaja višeg napona transformatora. Na osnovu utvrđenih rizika i godišnjeg broja udara groma u portal iznad transformatora izračunati su prosečni intervali vremena između dva uzastopna proboja fazne (T_f) i podužne (T_{pod}) izolacije namotaja transformatora i dati u tabeli 11.1.4.1.6.

Rezultati istraživanja pouzdanosti rada energetskih transformatora 400 kV/220 kV, 400 kV/110 kV i 220 kV/110 kV pri udaru groma u portal iznad njih ukazuju na sledeće:

- Izolaciju namotaja transformatora je neophodno štititi odvodnicima prenapona priključenim što bliže provodnim izolatorima transformatora. Efikasnost zaštite odvodnicima prenapona se bitno smanjuje produženjem provodne veze odvodnik prenapona - provodni izolatori transformatora i produženjem provodnika za uzemljenje između mase transformatora i odvodnika prenapona.
- Gromobranska zaštita ima dominantnu ulogu u zaštiti izolacije namotaja transformatora. Gromobranska užad sa obe strane portala iznad transformatora su najbolje i pravo rešenje; odsustvo gromobranskih užadi sa jedne strane portala povećava rizike proboja izolacije namotaja transformatora u proseku više od 4 puta, a odsustvo gromobranskih užadi sa obe strane portala u proseku više od 10 puta.
- Podužna izolacija namotaja energetskih transformatora može da bude više napregnuta nego fazna. Pouzdanost njenog rada može se povećavati konstruktivnim rešenjima namotaja transformatora sa jedne strane i smanjenjem mogućnosti njenog naprezanja sa druge strane. Ovo poslednje se postiže izborom adekvatne gromobranske zaštite (gromobranska užad sa obe strane portala iznad transformatora) i izborom izolatorskih lanaca portala nižeg naponskog nivoa sa višim podnosivim atmosferskim udarnim naponima (izolatorski lanci sa većim brojem članaka); time se smanjuje i rizik proboja fazne izolacije namotaja.

Tabela 11.1.4.1.1. Rizici proboja fazne (R_f) i podužne (R_{pod}) izolacije namotaja transformatora 220 kV/110 kV, 400 kV/220 kV i 400 kV/110 kV, zaštićenih metaloksidnim odvodnicima prenapona na kraćem (KR) i dužem (DR) rastojanju odvodnik prenapona-transformator po faznom provodniku, pri udaru groma u portal iznad transformatora sa različitim varijantama gromobranske zaštite.

Izolacija namotaja transformatora i izolatorskih lanaca portala		Varijanta gromobranske zaštite											
Transformator	Standardni podnosivi atmosferski udarni naponi višeg ($U_{p,V}$) i nižeg ($U_{p,N}$) naponskog nivoa $U_{p,V}/U_{p,N}$ (kV/kV)	Štapni gromobrani na portalu			Štapni gromobrani na portalu i gromobranska užad sa jedne strane portala - sa strane višeg naponskog nivoa				Gromobranska užad sa obe strane portala				
		KR	R_f	DR	R_{pod}	KR	R_f	DR	R_{pod}	KR	R_f	DR	R_{pod}
220 kV/110 kV	1050/550 950/550 850/550	0.074		0.133	0.194	0.024		0.044	0.093	0.008		0.009	0.015
	750/450 650/450	0.171		0.206	0.228	0.081		0.121	0.161	0.022		0.024	0.045
400 kV/110 kV	1425/550 1300/550	0.108		0.237	0.325	0.074		0.143	0.196	0.032		0.04	0.084
	1175/450 1050/450	0.205		0.35	0.43	0.166		0.22	0.285	0.095		0.117	0.15
400 kV/220 kV	1425/1050	0.009		0.018	0.059	0.004		0.005	0.019	0.001		0.002	0.003
	1425/950	0.013		0.03	0.103	0.005		0.007	0.034	0.002		0.004	0.005
	1300/850	0.033		0.05	0.14	0.009		0.022	0.064	0.003		0.006	0.007
	1175/750	0.055		0.093	0.186	0.023		0.028	0.093	0.005		0.011	0.015
	1050/650	0.14		0.15	0.256	0.056		0.065	0.144	0.009		0.022	0.038

Tabela 11.1.4.1.2. Rizici proboja fazne (R_f) i podužne (R_{pod}) izolacije namotaja transformatora 220 kV/110 kV, 400 kV/220 kV i 400 kV/110 kV, nezaštićenih odvodnicima prenapona, pri udaru groma u portal iznad transformatora sa različitim varijantama gromobranske zaštite.

Izolacija namotaja transformatora i izolatorskih lanaca portala		Varijanta gromobranske zaštite					
		Štapni gromobrani na portalu		Štapni gromobrani na portalu i gromobranska užad sa jedne strane portala - sa strane višeg naponskog nivoa		Gromobranska užad sa obe strane portala	
Transformator	Standardni podnosivi atmosferski udarni naponi višeg ($U_{p,V}$) i nižeg ($U_{p,N}$) naponskog nivoa $U_{p,V}/U_{p,N}$ (kV/kV)	R_f	R_{pod}	R_f	R_{pod}	R_f	R_{pod}
	750/450 650/450	0.22	0.228	0.133	0.161	0.027	0.045
400 kV/110 kV	1425/550 1300/550	0.244	0.325	0.145	0.196	0.048	0.084
	1175/450 1050/450	0.355	0.43	0.225	0.285	0.124	0.15
400 kV/220 kV	1425/1050	0.025	0.059	0.005	0.019	0.002	0.003
	1425/950	0.035	0.103	0.009	0.034	0.004	0.005
	1300/850	0.063	0.14	0.028	0.064	0.006	0.007
	1175/750	0.115	0.186	0.031	0.093	0.013	0.015
	1050/650	0.165	0.256	0.078	0.144	0.025	0.038

Tabela 11.1.4.1.3. Prosečni intervali vremena između dva uzastopna proboja fazne (T_f) i podužne (T_{pod}) izolacije namotaja transformatora 220 kV/110 kV, 400 kV/220 kV i 400 kV/110 kV, zaštićenih metaloksidnim odvodnicima prenapona na kraćem (KR) i dužem (DR) rastojanju odvodnik prenapona-transformator po faznom provodniku, pri udaru groma u portal iznad transformatora sa različitim varijantama gromobranske zaštite.

Izolacija namotaja transformatora i izolatorskih lanaca portala		Varijanta gromobranske zaštite								
Transformator	Standardni podnosivi atmosferski udarni naponi višeg ($U_{p,V}$) i nižeg ($U_{p,N}$) naponskog nivoa $U_{p,V}/U_{p,N}$ (kV/kV)	Štapni gromobrani na portalu			Štapni gromobrani na portalu i gromobranska užad sa jedne strane portala - sa strane višeg naponskog nivoa			Gromobranska užad sa obe strane portala		
		T_f (godina)		T_{pod} (godina)	T_f (godina)		T_{pod} (godina)	T_f (godina)		T_{pod} (godina)
		KR	DR		KR	DR		KR	DR	
220 kV/110 kV	1050/550 950/550 850/550	3378	1880	1289	10417	5682	2688	31250	27778	16667
	750/450 650/450	1462	1214	1096	3086	2066	1552	11364	10417	5556
400 kV/110 kV	1425/550 1300/550	772	352	256	1126	583	425	2604	2083	992
	1175/450 1050/450	406	238	194	502	379	292	877	712	556
400 kV/220 kV	1425/1050	9259	4630	1412	20833	16667	4386	83333	41667	27778
	1425/950	6410	2778	809	16667	11905	2451	41667	20833	16667
	1300/850	2525	1667	595	9259	3788	1302	27778	13889	11905
	1175/750	1515	896	448	3623	2976	896	16667	7576	5556
	1050/650	595	556	326	1488	1282	579	9259	3788	2193

Tabela 11.1.4.1.4. Prosečni intervali vremena između dva uzastopna proboja fazne (T_f) i podužne (T_{pod}) izolacije transformatora 220 kV/110 kV, 400 kV/220 kV i 400 kV/110 kV nezaštićenih odvodnicima prenapona, pri udaru groma u portal iznad transformatora sa različitim varijantama gromobranske zaštite.

Izolacija namotaja transformatora i izolatorskih lanaca portala		Varijanta gromobranske zaštite											
Transformator	Standardni podnosivi atmosferski udarni naponi višeg ($U_{p,V}$) i nižeg ($U_{p,N}$) naponskog nivoa $U_{p,V}/U_{p,N}$ (kV/kV)	Štapni gromobrani na portalu		Štapni gromobrani na portalu i gromobranska užad sa jedne strane portala - sa strane višeg naponskog nivoa		Gromobranska užad sa obe strane portala							
		T_f (godina)	T_{pod} (godina)	T_f (godina)	T_{pod} (godina)	T_f (godina)	T_{pod} (godina)						
220 kV/110 kV	1050/550 950/550 850/550	1667	1289	4717	2688	27778	16667						
	750/450 650/450							1136	1096	1880	1553	9259	5556
400 kV/110 kV	1425/550 1300/550	342	256	575	425	1736	992						
	1175/450 1050/450							235	194	370	292	672	556
	1425/1050							3333	1412	16667	4386	41667	27778
400 kV/220 kV	1425/950	2381	809	9259	2451	20833	16667						
	1300/850	1323	595	2976	1302	13889	11905						
	1175/750	725	448	2688	896	6410	5556						
	1050/650	505	325	1068	579	3333	2193						

Tabela 11.1.4.1.5. Rizici proboja fazne (R_f) i podužne (R_{pod}) izolacije namotaja transformatora 220 kV/110 kV/, 400 kV/220 kV i 400 kV/110 kV, zaštićenih metaloksidnim odvodnicima prenapona (kraće rastojanje odvodnik-transformator po faznom provodniku - sl. 11.1.4.2.) pri udaru groma u portal iznad transformatora sa različitim varijantama gromobranske zaštite (podnosivi atmosferski udarni napon svih izolatorskih lanaca portala iznad transformatora jednaki podnosivim atmosferskim udarnim naponima izolacije namotaja višeg napona transformatora).

Izolacija namotaja transformatora i izolatorskih lanaca portala		Standardni podnosivi atmosferski udarni napon svih izolatorskih lanaca portala iznad transformatora (kV)	Varijanta gromobranske zaštite					
Transformator	Standardni podnosivi atmosferski udarni naponi višeg ($U_{p,V}$) i nižeg ($U_{p,N}$) naponskog nivoa $U_{p,V}/U_{p,N}$ (kV/kV)		Štapni gromobrani na portalu		Štapni gromobrani na portalu i gromobranska užad sa jedne strane portala - sa strane višeg naponskog nivoa		Gromobranska užad sa obe strane portala	
			R_f	R_{pod}	R_f	R_{pod}	R_f	R_{pod}
220 kV/110 kV	1050/550	1050	0.006	0.020	$<10^{-3}$	0.002	$<10^{-3}$	$<10^{-3}$
	950/550	950	0.012	0.034	0.004	0.004	$<10^{-3}$	$<10^{-3}$
	850/550	850	0.022	0.048	0.006	0.011	$<10^{-3}$	0.005
	750/450	750	0.049	0.09	0.014	0.021	0.001	0.011
	650/450	650	0.088	0.13	0.026	0.044	0.004	0.013
400 kV/110 kV	1425/550	1425	0.011	0.021	$<10^{-3}$	$<10^{-3}$	$<10^{-3}$	$<10^{-3}$
	1300/550	1300	0.018	0.032	$<10^{-3}$	0.005	$<10^{-3}$	$<10^{-3}$
	1175/450	1175	0.028	0.043	0.002	0.009	$<10^{-3}$	$<10^{-3}$
	1050/450	1050	0.037	0.059	0.004	0.019	0.001	0.003
400 kV/220 kV	1425/1050	1425	0.004	0.021	$<10^{-3}$	$<10^{-3}$	$<10^{-3}$	$<10^{-3}$
	1425/950	1425	0.008	0.021	$<10^{-3}$	$<10^{-3}$	$<10^{-3}$	$<10^{-3}$
	1300/850	1300	0.015	0.032	$<10^{-3}$	0.005	$<10^{-3}$	$<10^{-3}$
	1175/750	1175	0.026	0.043	0.004	0.009	$<10^{-3}$	0.002
	1050/650	1050	0.035	0.059	0.008	0.019	0.001	0.003

Tabela 11.1.4.1.6. Prosečni intervali vremena između dva uzastopna proboja fazne (T_f) i podužne (T_{pod}) izolacije namotaja transformatora 220 kV/110 kV, 400 kV/220 kV i 400 kV/110 kV, zaštićenih metaloksidnim odvodnicima prenapona (kraće rastojanje odvodnik-transformator po faznom provodniku - sl. 11.1.4.2.), pri udaru groma u portal iznad transformatora sa različitim varijantama gromobranske zaštite (podnosivi atmosferski udarni naponi svih izolatorskih lanaca portala iznad transformatora jednaki podnosivim atmosferskim udarnim naponima izolacije namotaja višeg napona transformatora).

Transformator	Izolacija namotaja transformatora i izolatorskih lanaca portala Standardni podnosivi atmosferski udarni naponi višeg ($U_{p,V}$) i nižeg ($U_{p,N}$) naponskog nivoa $U_{p,V}/U_{p,N}$ (kV/kV)	Standardni podnosivi atmosferski udarni napon svih izolatorskih lanaca portala iznad transformatora (kV)	Varijanta gromobranske zaštite					
			Štapni gromobrani na portalu		Štapni gromobrani na portalu i gromobranska užad sa jedne strane portala - sa strane višeg naponskog nivoa		Gromobranska užad sa obe strane portala	
			T_f (godina)	T_{pod} (godina)	T_f (godina)	T_{pod} (godina)	T_f (godina)	T_{pod} (godina)
220 kV/110 kV	1050/550	1050	41667	12500	>250000	125000	>250000	>250000
	950/550	950	20833	7353	62500	62500	>250000	>250000
	850/550	850	11364	5208	41667	22727	>250000	50000
	750/450	750	5102	2778	17857	11905	250000	22727
	650/450	650	2841	1923	9615	5682	62500	19231
400 kV/110 kV	1425/550	1425	7576	3968	>83333	>83333	>83333	>83333
	1300/550	1300	4630	2604	>83333	16667	>83333	>83333
	1175/450	1175	2976	1938	41667	9259	>83333	>83333
	1050/450	1050	2252	1412	20833	4386	83333	27778
400 kV/220 kV	1425/1050	1425	20833	3968	>83333	>83333	>83333	>83333
	1425/950	1425	10417	3968	>83333	>83333	>83333	>83333
	1300/850	1300	5556	2604	>83333	16667	>83333	>83333
	1175/750	1175	3205	1938	20833	9259	>83333	>83333
	1050/650	1050	2381	1412	10417	4386	83333	27778

11.1.4.2. Parametri pouzdanosti izolacije namotaja transformatora pri udaru groma u štapne gromobrane i gromobrasku užad portala TS

Posmatrani su udari groma u štapne gromobrane i gromobrasku užad na prvim susednim portalima višeg i nižeg naponskog nivoa TS do portala iznad transformatora i prenaponi koji usled njih naprežu izolaciju namotaja transformatora 400 kV/220 kV, 400 kV/110 kV i 220 kV/110 kV. Pretpostavljeno je da udari groma u štapne gromobrane i gromobrasku užad na ostalim portalima bliskim pogođenom, dovode do prenapona koji naprežu izolaciju namotaja transformatora isto kao udari u gromobrasku zaštitu na prvim susednim portalima do portala transformatora. Na ovaj način ustanovljeni rizici proboja izolacije namotaja transformatora su veći od stvarnih. Kao u delu 11.1.4.1. primenjeno je po 1000 udara groma u gromobrasku zaštitu na susednim portalima do portala iznad transformatora i utvrđeni su iz izraza (11.1.4.1.3.) rizici proboja za iste standardizovane podnosive atmosferske udarne napone izolatorskih lanaca i namotaja transformatora 400 kV/220 kV, 400 kV/110 kV i 220 kV/110 kV višeg i nižeg nivoa. Isti su dati u tabelama 11.1.4.2.1., 11.1.4.2.2. i 11.1.4.2.3 za kraće i duže rastojanje odvodnik - transformator po faznom provodniku.

U istim tabelama za kraću vezu odvodnik - transformator su dati rizici proboja izolacije namotaja transformatora kada su podnosivi atmosferski udarni naponi svih izolatorskih lanaca portala iznad transformatora izjednačeni sa podnosivim atmosferskim udarnim naponima izolacije namotaja višeg napona transformatora.

Za tipične TS 400 kV/220 kV, TS 400 kV/110 kV i TS 220 kV/110 kV procenjene su ekvivalentne prihvatne površine na kojima se mogu očekivati udari groma u gromobrasku zaštitu na portalima višeg i nižeg naponskog nivoa TS; one iznose:

$S_{400} = 0.08 \text{ km}^2$ za delove pod naponom 400 kV u TS 400 kV/220 kV i TS 400 kV/110 kV.

$S_{200} = 0.05 \text{ km}^2$ za delove pod naponom 220 kV u TS 400 kV/220 kV i TS 220 kV/110 kV.

$S_{110} = 0.03 \text{ km}^2$ za delove pod naponom 110 kV u TS 400 kV/110 kV i TS 220 kV/110 kV.

Pretpostavljeno je da oko 30% napred navedenih ekvivalentnih prihvatnih površina TS pripada površinama u kojima udari groma u portale i gromobrasku užad mogu biti opasni po izolaciju namotaja transformatora. Takođe je pretpostavljeno da se TS nalazi na području sa 4 udara groma po 1 km^2 godišnje.

Na osnovu utvrđenih rizika proboja u tabelama 11.1.4.2.1., 11.1.4.2.2. i 11.1.4.2.3. i godišnjeg broja udara groma u 400 kV, 220 kV i 110 kV delove TS, u površine u kojima su udari groma opasni po izolaciju namotaja transformatora, izračunate su vrednosti prosečnih intervala vremena između dva uzastopna proboja fazne izolacije namotaja transformatora i date u tabelama 11.1.4.2.4., 11.1.4.2.5. i 11.1.4.2.6.

Tabela 11.1.4.2.1 Rizici proboja (R_f) fazne izolacije namotaja transformatora 220 kV/110 kV, zaštićenog metaloksidnim odvodnicima prenapona priključenim na kraćem (KR) i dužem (DR) rastojanju po faznom provodniku od provodnih izolatora transformatora, pri udaru groma u gromobransku zaštitu TS 220 kV/110 kV

Mesto udara groma	Standardni podnosivi atmosferski udarni naponi višeg ($U_{p,V}$) i nižeg ($U_{p,N}$) naponskog nivoa $U_{p,V}/U_{p,N}$ kV/kV		Rizici proboja (R_f) fazne izolacije za različite vrste gromobranske zaštite TS					
	izolatorski lanci portala iznad transformatora	izolatorski lanci TS i izolacija namotaja transformatora	Štapni gromobrani na portalima 220 kV i 110 kV		Štapni gromobrani na portalima 110 kV i gromobranska užad na portalima 220 kV		Gromobranska užad na portalima 110 kV i 220 kV	
			KR	DR	KR	DR	KR	DR
Gromobranska zaštita 220 kV dela TS	1050/550		0.001	0.011	$<10^{-3}$	$<10^{-3}$	$<10^{-3}$	$<10^{-2}$
	950/550		0.005	0.019	$<10^{-3}$	$<10^{-3}$	$<10^{-3}$	$<10^{-2}$
	850/550		0.025	0.030	0.001	0.002	0.001	0.002
	750/450		0.033	0.043	0.005	0.008	0.005	0.008
	650/450		0.06	0.073	0.012	0.016	0.012	0.016
	1050/1050	1050/550	0.001	0.011	$<10^{-3}$	$<10^{-3}$	$<10^{-3}$	$<10^{-2}$
	950/950	950/550	0.005	0.019	$<10^{-3}$	$<10^{-3}$	$<10^{-3}$	$<10^{-2}$
	850/850	850/550	0.025	0.030	0.001	0.002	0.001	0.002
	750/750	750/450	0.033	0.043	0.005	0.008	0.005	0.008
	650/650	650/450	0.06	0.073	0.012	0.016	0.012	0.016
Gromobranska zaštita 110 kV dela TS	1050/550		0.044	0.07	0.044	0.07	0.005	0.007
	950/550							
	850/550							
	750/450		0.11	0.13	0.11	0.13	0.02	0.028
	650/450		0.044	0.07	0.044	0.07	0.005	0.007
	1050/1050	1050/550						
	950/950	950/550						
	850/850	850/550						
750/750	750/450	0.11						
650/650	650/450	0.11	0.13	0.11	0.13	0.02	0.028	

Tabela 11.1.4.2.2. Rizici proboja (R_f) fazne izolacije namotaja transformatora 400 kV/110 kV, zaštićenog metaloksidnim odvodnicima prenapona priključenim na kraćem (KR) i dužem (DR) rastojanju po faznom provodniku od provodnih izolatora transformatora, pri udaru groma u gromobransku zaštitu TS 400 kV/110 kV

Mesto udara groma	Standardni podnosivi atmosferski udarni naponi višeg ($U_{p,V}$) i nižeg ($U_{p,N}$) naponskog nivoa $U_{p,V}/U_{p,N}$ kV/kV		Rizici proboja (R_f) fazne izolacije za različite vrste gromobranske zaštite TS					
	izolatorski lanci portala iznad transformatora	izolatorski lanci TS i izolacija namotaja transformatora	Štapni gromobrani na portalima 400 kV i 110 kV		Štapni gromobrani na portalima 110 kV i gromobranska užad na portalima 400 kV		Gromobranska užad na portalima 400 kV i 110 kV	
			KR	DR	KR	DR	KR	DR
Gromobranska zaštita 400 kV dela TS	1425/550		0.004	0.006	$<10^{-2}$	$<10^{-2}$	$<10^{-2}$	$<10^{-2}$
	1300/550		0.011	0.015	$<10^{-2}$	$<10^{-2}$	$<10^{-2}$	$<10^{-2}$
	1175/450		0.02	0.024	$<10^{-2}$	0.001	$<10^{-2}$	0.001
	1050/450		0.03	0.035	0.005	0.007	0.005	0.007
	1425/1425	1425/550	0.004	0.006	$<10^{-2}$	$<10^{-2}$	$<10^{-2}$	$<10^{-2}$
	1300/1300	1300/550	0.011	0.015	$<10^{-2}$	$<10^{-2}$	$<10^{-2}$	$<10^{-2}$
	1175/1175	1175/450	0.02	0.024	$<10^{-2}$	0.001	$<10^{-2}$	0.001
	1050/1050	1050/450	0.03	0.035	0.005	0.007	0.005	0.007
Gromobranska zaštita 110 kV dela TS	1425/550		0.05	0.075	0.05	0.075	0.006	0.009
	1300/550							
	1175/450		0.12	0.135	0.12	0.135	0.023	0.032
	1050/450							
	1425/1425	1425/550						
	1300/1300	1300/550	0.05	0.075	0.05	0.075	0.006	0.009
	1175/1175	1175/450						
	1050/1050	1050/450	0.12	0.135	0.12	0.134	0.023	0.032

Tabela 11.1.4.2.3. Rizici proboja (R_f) fazne izolacije namotaja transformatora 400 kV/220 kV, zaštićenog metaloksidnim odvodnicima prenapona priključenim na kraćem (KR) i dužem (DR) rastojanju po faznom provodniku od provodnih izolatora transformatora, pri udaru groma u gromobransku zaštitu TS 400 kV/220 kV

Mesto udara groma	Standardni podnosivi atmosferski udarni naponi višeg ($U_{p,V}$) i nižeg ($U_{p,N}$) naponskog nivoa $U_{p,V}/U_{p,N}$ kV/kV		Rizici proboja (R_f) fazne izolacije za različite vrste gromobranske zaštite TS					
			Štapni gromobrani na portalima 400 kV i 220 kV		Štapni gromobrani na portalima 220 kV i gromobranska užad na portalima 400 kV		Gromobranska užad na portalima 400 kV i 220 kV	
			izolatorski lanci portala iznad transformatora	izolatorski lanci TS i izolacija namotaja transformatora	KR	DR	KR	DR
Gromobranska zaštita 400 kV dela TS	1425/1050		0.004	0.006	$<10^{-3}$	$<10^{-3}$	$<10^{-3}$	$<10^{-3}$
	1425/950		0.004	0.006	$<10^{-3}$	$<10^{-3}$	$<10^{-3}$	$<10^{-3}$
	1300/850		0.011	0.015	$<10^{-3}$	$<10^{-3}$	$<10^{-3}$	$<10^{-3}$
	1175/750		0.02	0.024	$<10^{-3}$	0.001	$<10^{-3}$	0.001
	1050/650		0.03	0.035	0.005	0.007	0.005	0.007
	1425/1425	1425/1050	0.004	0.006	$<10^{-3}$	$<10^{-3}$	$<10^{-3}$	$<10^{-3}$
	1425/1425	1425/950	0.004	0.006	$<10^{-3}$	$<10^{-3}$	$<10^{-3}$	$<10^{-3}$
	1300/1300	1300/850	0.011	0.015	$<10^{-3}$	$<10^{-3}$	$<10^{-3}$	$<10^{-3}$
	1175/1175	1175/750	0.02	0.024	$<10^{-3}$	0.001	$<10^{-3}$	0.001
	1050/1050	1050/650	0.03	0.035	0.005	0.007	0.005	0.007
Gromobranska zaštita 220 kV dela TS	1425/1050		0.001	0.012	0.001	0.012	$<10^{-3}$	$<10^{-3}$
	1425/950		0.007	0.019	0.007	0.019	$<10^{-3}$	$<10^{-3}$
	1300/850		0.024	0.03	0.024	0.03	0.001	0.002
	1175/750		0.038	0.045	0.038	0.045	0.002	0.004
	1050/650		0.066	0.075	0.066	0.075	0.006	0.009
220 kV dela TS	1425/1425	1425/1050	0.001	0.012	0.001	0.012	$<10^{-3}$	$<10^{-3}$
	1425/1425	1425/950	0.007	0.019	0.007	0.019	$<10^{-3}$	$<10^{-3}$
	1300/1300	1300/850	0.024	0.03	0.024	0.03	0.001	0.002
	1175/1175	1175/750	0.038	0.045	0.038	0.045	0.002	0.004
	1050/1050	1050/650	0.066	0.075	0.066	0.075	0.006	0.009

Tabela 11.1.4.2.4. Prosečni intervali vremena između dva uzastopna proboja fazne izolacije (T_f) namotaja transformatora 220 kV/110 kV zaštićenog metaloksidnim odvodnicima prenapona priključenim na kraćem (KR) i dužem (DR) rastojanju po faznom provodniku od provodnih izolatora transformatora pri udaru groma u gromobransku zaštitu TS 220 kV/110 kV.

Mesto udara groma	Standardni podnosivi atmosferski udarni naponi višeg ($U_{p,V}$) i nižeg ($U_{p,N}$) naponskog nivoa $U_{p,V}/U_{p,N}$ kV/kV		Prosečni intervali vremena između dva uzastopna proboja (T_f) fazne izolacije za različite vrste gromobranske zaštite TS 220 kV/110 kV					
			Štapni gromobrani na portalima 220 kV i 110 kV		Štapni gromobrani na portalima 110 kV i gromobranska užad na portalima 220 kV		Gromobranska užad na portalima 220 kV i 110 kV	
	izolatorski lanci portala iznad transformatora	izolatorski lanci TS i izolacija namotaja transformatora	KR (god)	DR (god)	KR (god)	DR (god)	KR (god)	DR (god)
Gromobranska zaštita 220 kV dela TS	1050/550		16667	1515	>16667	>16667	>16667	>16667
	950/550		3333	877	>16667	>16667	>16667	>16667
	850/550		667	556	16667	8333	16667	8333
	750/450		505	388	3333	2083	3333	2083
	650/450		278	228	1389	1042	1389	1042
	1050/1050	1050/550	16667	1515	>16667	>16667	>16667	>16667
	950/950	950/550	3333	877	>16667	>16667	>16667	>16667
	850/850	850/550	667	556	16667	8333	16667	8333
	750/750	750/450	505	388	3333	2083	3333	2083
	650/650	650/450	278	228	1389	1042	1389	1042
	Gromobranska zaštita 110 kV dela TS	1050/550		631	397	631	397	5556
950/550								
850/550								
750/450		252	214	252	214	1389	992	
650/450								
1050/1050								1050/550
950/950		950/550	631	397	631	397	5556	3968
850/850		850/550	252	214	252	214	1389	992
750/750		750/450						
650/650		650/450						

Tabela 11.1.4.2.5. Prosečni intervali vremena između dva uzastopna proboja fazne izolacije (T_f) namotaja transformatora 400 kV/110 kV zaštićenog metaloksidnim odvodnicima prenapona priključenim na kraćem (KR) i dužem (DR) rastojanju po faznom provodniku od provodnih izolatora transformatora pri udaru groma u gromobransku zaštitu TS 400 kV/110 kV.

Mesto udara groma	Standardni podnosivi atmosferski udarni naponi višeg ($U_{p,V}$) i nižeg ($U_{p,N}$) naponskog nivoa $U_{p,V}/U_{p,N}$ kV/kV		Prosečni intervali vremena između dva uzastopna proboja (T_f) fazne izolacije za različite vrste gromobranske zaštite TS 400 kV/110 kV					
			Štapni gromobrani na portalima 400 kV i 110 kV		Štapni gromobrani na portalima 110 kV i gromobranska užad na portalima 400 kV		Gromobranska užad na portalima 400 kV i 110 kV	
	izolatorski lanci portala iznad transformatora	izolatorski lanci TS i izolacija namotaja transformatora	KR (god)	DR (god)	KR (god)	DR (god)	KR (god)	DR (god)
Gromobranska zaštita 400 kV dela TS	1425/550		2604	1736	>10417	>10417	>10417	>10417
	1300/550		947	694	>10417	>10417	>10417	>10417
	1175/450		521	434	>10417	10417	>10417	10417
	1050/450		347	298	2083	1488	2083	1488
	1425/1425	1425/550	2604	1736	>10417	>10417	>10417	>10417
	1300/1300	1300/550	947	694	>10417	>10417	>10417	>10417
	1175/1175	1175/450	521	434	>10417	>10417	>10417	>10417
	1050/1050	1050/450	347	298	2083	1488	2083	1488
Gromobranska zaštita 110 kV dela TS	1425/550		556	370	556	370	4630	3086
	1300/550							
	1175/450		231	206	231	206	1208	868
	1050/450							
	1425/1425	1425/550	556	370	556	370	4630	3086
	1300/1300	1300/550						
	1175/1175	1175/450	231	206	231	206	1208	868
	1050/1050	1050/450						

Tabela 11.1.4.2.6. Prosečni intervali vremena između dva uzastopna proboja fazne izolacije (T_f) namotaja transformatora 400 kV/220 kV zaštićenog metaloksidnim odvodnicima prenapona priključenim na kraćem (KR) i dužem (DR) rastojanju po faznom provodniku od provodnih izolatora transformatora pri udaru грома u gromobransku zaštitu TS 400 kV/220 kV.

Mesto udara грома	Standardni podnosivi atmosferski udarni naponi višeg ($U_{p,V}$) i nižeg ($U_{p,N}$) naponskog nivoa $U_{p,V}/U_{p,N}$ kV/kV		Prosečni intervali vremena između dva uzastopna proboja (T_f) fazne izolacije za različite vrste gromobranske zaštite TS 400 kV/220 kV					
			Štapni gromobrani na portalima 400 kV i 220 kV		Štapni gromobrani na portalima 220 kV i gromobranska užad na portalima 400 kV		Gromobranska užad na portalima TS	
	izolatorski lanci portala iznad transformatora	izolatorski lanci TS i izolacija namotaja transformatora	KR (god)	DR (god)	KR (god)	DR (god)	KR (god)	DR (god)
Gromobranska zaštita 400 kV dela TS	1425/1050		2604	1736	>10417	>10417	>10417	>10417
	1425/950		2604	1736	>10417	>10417	>10417	>10417
	1300/850		947	694	>10417	>10417	>10417	>10417
	1175/750		521	434	>10417	10417	>10417	10417
	1050/650		347	298	2083	1488	2083	1488
	1425/1425	1425/1050	2604	1736	>10417	>10417	>10417	>10417
	1425/1425	1425/950	2604	1736	>10417	>10417	>10417	>10417
	1300/1300	1300/850	947	694	>10417	>10417	>10417	>10417
	1175/1175	1175/750	521	434	>10417	10417	>10417	10417
	1050/1050	1050/650	347	298	2083	1488	2083	1488
Gromobranska zaštita 220 kV dela TS	1425/1050		16667	1389	16667	1389	>16667	>16667
	1425/950		2381	877	2381	877	>16667	>16667
	1300/850		694	556	694	556	16667	8333
	1175/750		439	370	439	370	8333	4167
	1050/650		252	222	252	222	2778	1852
	1425/1425	1425/1050	16667	1389	16667	1389	>16667	>16667
	1425/1425	1425/950	2381	877	2381	877	>16667	>16667
	1300/1300	1300/850	694	556	694	556	16667	8333
	1175/1175	1175/750	439	370	439	370	8333	4167
	1050/1050	1050/650	252	222	252	222	2778	1852

11.1.4.3. Parametri pouzdanosti izolacije namotaja transformatora pri prodoru groma kroz gromobransku zaštitu TS

Za izolaciju namotaja transformatora opasni su samo udari groma direktno u fazne provodnike u neposrednoj blizini transformatora, odnosno u fazne provodnike koji dolaze iz višenaponskog i niženaponskog dela TS ka portalu iznad transformatora. Kada je prisutno gromobransko uže sa obe strane portala iznad transformatora, mogućnost direktnog udara u fazne provodnike je mala. U toj varijanti gromobranske zaštite prodor kroz gromobransku zaštitu prema elektrogeometrijskoj metodi mogu izazvati samo struje groma veoma malih amplituda, a ove ne dovode do prenapona opasnih po izolaciju namotaja transformatora. Na osnovu elektrogeometrijske metode procenjen je rizik direktnog udara groma u fazne provodnike u neposrednoj blizini transformatora 400 kV/220 kV, 400 kV/110 kV i 220 kV/110 kV kada na portalu iznad njih postoje štapni gromobrani i gromobranska užad samo sa jedne strane i kada postoje samo štapni gromobrani.

Ustanovljeno je da rizik prodora groma pri primeni 10000 struja groma može da bude za određene varijante gromobranske zaštite i veći od 0.05 i da se pri tom može očekivati preskok na spoljašnjoj izolaciji u više od 40% slučajeva. Rizik proboja izolacije namotaja transformatora za duže rastojanje odvodnik-transformator može da dostigne i do 0.01, a za kraće rastojanje odvodnik-transformator je ispod 0.001. Da bi se utvrdio rizik proboja izolacije namotaja transformatora pri prodoru groma kroz gromobransku zaštitu u zavisnosti od atmosferskih podnosivih napona izolacije namotaja, potrebno je preciznije utvrđivanje prihvatne površine faznih provodnika i gromobrana na portalima; one su ovde procenjivane u zavisnosti od amplituda struja groma. U tabeli 11.1.4.3.1. su dati prosečni intervali vremena između dva uzastopna proboja fazne izolacije namotaja transformatora 400 kV/220 kV, 400 kV/110 kV i 220 kV/110 kV pri udaru groma u fazne provodnike u neposrednoj blizini transformatora prodorom kroz gromobransku zaštitu; izračunati su na osnovu očekivanih godišnjih brojeva proboja izolacije namotaja transformatora dobijenih iz sledećih izraza:

$$T_f = \frac{1}{N_{pr.VN} + N_{pr.NN}} = \frac{10000}{n_{g,1km^2} \sum_{i=1}^{10000} (P_{pr.VN,i} \cdot S_{I,VN,i} + P_{pr.NN,i} \cdot S_{I,NN,i})} \quad (11.1.4.3.1.)$$

Ovde su:

$N_{pr.VN}$ - očekivani godišnji broj proboja izolacije namotaja transformatora pri prodoru groma kroz gromobransku zaštitu višenaponskog dela TS neposredno pored transformatora i udaru u fazne provodnike,

$N_{pr.NN}$ - očekivani godišnji broj proboja izolacije namotaja transformatora pri prodoru groma kroz gromobransku zaštitu niženaponskog dela TS neposredno pored transformatora i udaru groma u fazne provodnike,

$P_{pr.VN,i}$ - verovatnoća proboja izolacije namotaja transformatora pri prodoru struje groma amplitude I_i kroz gromobransku zaštitu višenaponskog dela TS i udaru u fazne provodnike,

$P_{pr.NN,i}$ - verovatnoća proboja izolacije namotaja transformatora pri prodoru struje groma amplitude I_i kroz gromobransku zaštitu niženaponskog dela TS i udaru u fazne provodnike,

$S_{I,VN,i}$, $S_{I,NN,i}$ - ekvivalentna prihvatna površina faznih provodnika višenaponskog i niženaponskog dela TS u blizini portala iznad transformatora pri udaru groma struje amplitude I_i ,

I_i - amplituda i-te struje groma u uzorku od 10000 ($i=1, \dots, 10000$) izabranih amplituda struja groma,

$n_{g,1km^2}$ - godišnji broj udara groma na 1 km² ($n_{g,1km^2}=4$).

Prodori groma kroz gromobransku zaštitu TS i udari u fazne provodnike u ostalim delovima TS dalje od portala iznad transformatora, imaju zaista malu mogućnost proboja izolacije namotaja transformatora, čak i kada je TS zaštićena samo štapnim gromobranima.

Tabela 11.1.4.3.1. Prosečni intervali vremena (T_f) između dva uzastopna proboja fazne izolacije namotaja transformatora 400 kV/220 kV, 400 kV/110 kV i 220 kV/110 kV, zaštićenih metaloksidnim odvodnicima prenapona na kraćem (KR) i dužem (DR) rastojanju odvodnik prenapona-transformator po faznom provodniku, pri prodoru groma kroz gromobransku zaštitu i udaru u fazne provodnike višeg i nižeg napona u neposrednoj blizini transformatora za različite varijante gromobranske zaštite

Transformator	Standardni podnosivi atmosferski udarni naponi višeg ($U_{p,V}$) i nižeg ($U_{p,N}$) naponskog nivoa $U_{p,V}/U_{p,N}$ (kV/kV)	Varijanta gromobranske zaštite					
		Štapni gromobrani na portalima		Štapni gromobrani na portalima i gromobranska užad sa jedne strane portala-sa strane višeg naponskog nivoa		Gromobranska užad sa obe strane portala	
		KR (godina)	T_f DR (godina)	KR (godina)	T_f DR (godina)	KR (godina)	T_f DR (godina)
220 kV/110 kV	1050/550	>125.000	12.500	>125.000	25.000	>125.000	>125.000
	950/550						
	850/550						
	750/450						
	650/450						
400 kV/110 kV	1425/550	>50.000	5.000	>50.000	10.000	>50.000	>50.000
	1300/550						
	1175/450						
	1050/450						
400 kV/220 kV	1425/1050	>50.000	5.000	>50.000	10.000	>50.000	>50.000
	1425/950						
	1300/850						
	1175/750						
	1050/650						

11.1.4.4. Parametri pouzdanosti izolacije namotaja transformatora pri propagaciji atmosferskih prenapona nadzemnim vodovima koji se susstiču u TS

Posmatrane su dve karakteristične konfiguracije A i B u TS 400 kV/220 kV, TS 400 kV/110 kV i 220 kV/110 kV u kojima je analizirana ugroženost izolacije namotaja transformatora pri propagaciji atmosferskih prenapona nadzemnim vodovima 400 kV, 220 kV i 110 kV. U konfiguraciji A u TS su na sabirnicama višeg i nižeg napona priključeni po jedan nadzemni vod, a između sabirnica jedan energetski transformator. Ova konfiguracija je najteža sa gledišta ugroženosti izolacije namotaja transformatora pri propagaciji atmosferskih prenapona nadzemnim vodovima u TS. U konfiguraciji B u TS su na sabirnicama 400 kV priključeni 3 nadzemna voda, na sabirnicama 220 kV 4 nadzemna voda i na sabirnicama 110 kV 5 nadzemnih vodova, a između sabirnica po dva transformatora. Ova konfiguracija se često sreće u TS i vremenski je najduže u pogonu tokom godine. Za rastojanje prvog stuba voda od TS je usvojeno 100 m za nadzemne vodove 110 kV i 200 m za nadzemne vodove 220 kV i 400 kV. Primenjeno je po 1000 udara groma u prvih nekoliko stubova i u gromobransku užad nadzemnih vodova 400 kV, 220 kV i 110 kV koji se susstiču u TS kada je TS u konfiguraciji A i kada je u konfiguraciji B kao i udari groma kroz njihovu gromobransku zaštitu. Usvojeno je da je ekvivalentna otpornost uzemljenja stubova 10Ω . U svim ovim slučajevima ustanovljeni su naponi na izolaciji namotaja transformatora. Na osnovu njih su utvrđene verovatnoće proboja izolacije namotaja transformatora za svaki udar groma, a na osnovu ovih rizici proboja, i kao poslednji, prosečni intervali vremena između dva uzastopna proboja fazne izolacije namotaja transformatora.

Rizici proboja su ustanovljeni iz izraza 11.1.4.1.3. za udare groma u stubove voda i za udare groma u gromobransku užad i fazne provodnike na rasponu između stubova. Prosečni intervali vremena između dva uzastopna proboja izolacije namotaja transformatora su ustanovljeni iz izraza:

$$T_f = \frac{1}{n_{g,1km^2} \sum_j \sum_i (S_{i,j,s} R_{i,j,s} + S_{i,j,r} R_{i,j,r} + \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N p_{pr,i,j,k} S_{i,j,f,k})} \quad (11.1.4.4.1.)$$

Ovde su: $R_{i,j,s}$ - rizik proboja izolacije namotaja transformatora pri udaru groma u i-ti stub j-tog voda,

$R_{i,j,r}$ - rizik proboja izolacije namotaja transformatora pri udaru groma u gromobransku užad i-tog raspona j-tog voda,

$p_{pr,i,j,k}$ - verovatnoća proboja izolacije namotaja transformatora pri prodoru struje groma amplitude I_k kroz gromobransku zaštitu i udaru u fazne provodnike i-tog raspona j-tog voda,

$S_{i,j,s}$ - ekvivalentna prihvatna površina i-tog stuba j-tog voda,

$S_{i,j,r}$ - ekvivalentna prihvatna površina gromobranskih užadi i-tog raspona j-tog voda,

$S_{i,j,f,k}$ - ekvivalentna prihvatna površina faznih provodnika i-tog raspona j-tog voda pri prodoru struje groma amplitude I_k ,

$n_{g,1km^2}$ - godišnji broj udara groma na 1 km^2 ($n_{g,1km^2} = 4$).

Ustanovljeno je da su rizici proboja izolacije namotaja transformatora pri udaru groma u vod od trećeg stuba od TS na dalje praktično zanemarivi.

Konstatovano je da su u konfiguracijama A i B u TS 400 kV/220 kV, TS 400 kV/110 kV i 220 kV/110 kV prosečni intervali vremena između dva uzastopna proboja fazne izolacije namotaja transformatora veoma veliki i u slučajevima najnižih podnosivih udarnih napona izolacije namotaja transformatora (450 kV za 110 kV, 650 kV za 220 kV i 1050 kV za 400 kV) za slučaj kraćeg rastojanja odvodnik prenapona-transformator bez obzira da li je TS sa štapnim gromobranima ili gromobranskim užadima ili sa njihovom kombinacijom. Najniži prosečni interval vremena između dva uzastopna proboja fazne izolacije namotaja transformatora je iznad 20.000 godina.

U tabelama 11.1.4.4.1. i 11.1.4.4.2. su dati prosečni intervali vremena između dva uzastopna proboja fazne izolacije namotaja transformatora u konfiguracijama A i B u TS 400 kV/220 kV, 400 kV/110 kV i 220 kV/110 kV za duže rastojanje odvodnik-transformator.

Rezultati izloženi u tabelama 11.1.4.4.1. i 11.1.4.4.2. su dobijeni za određen raspored transformatorskog i dalekovodnih polja na sabirnicama 400 kV, 220 kV i 110 kV; u konfiguraciji A transformatorsko i dalekovodno polje su jedno do drugog i nalaze se na sredini sabirnica, a u konfiguraciji B transformatorska polja su na sredini sabirnica, a dalekovodna polja su simetrično raspoređena sa njihove jedne i druge strane.

TS zaštićena gromobranskim užadima omogućava prodor prenapona nešto viših amplituda faznim provodnicima vodova, koji se susište u TS, nego kada je zaštićena štapnim gromobranima, zbog pojave indukovanih prenapona u gromobranskim užadima.

Naziv objekta	Naponski nivo (kV)	Broj sabirnica	Rezultati izračuna (kV)		
			Uzdužna pad napona	Prenapon	Prenapon sa užadima
TS 400 kV	400	3	100	100	100
			100	100	100
			100	100	100
TS 220 kV	220	3	100	100	100
			100	100	100
			100	100	100
TS 110 kV	110	3	100	100	100
			100	100	100
			100	100	100

Tabela 11.1.4.4.1. Prosečni intervali vremena (T_f) između dva uzastopna proboja fazne izolacije namotaja transformatora 400 kV/220 kV, 400 kV/110 kV i 220 kV/110 kV zaštićenih metaloksidnim odvodnicima prenapona sa dužim rastojanjem odvodnik prenapona-transformator po faznom provodniku, pri propagaciji atmosferskih prenapona nadzemnim vodovima 400 kV, 220 kV i 110 kV u konfiguraciji A TS sa različitim varijantama gromobranske zaštite.

Nadzemni vodovi koji se susiće na sabirnicama TS	Transformator	Standardni podnosivi atmosferski udarni naponi višeg ($U_{p,v}$) i nižeg ($U_{p,N}$) naponskog nivoa $U_{p,v}/U_{p,N}$ (kV/kV)	Prosečni intervali vremena (T_f) između dva uzastopna proboja fazne izolacije namotaja transformatora sa različitim varijantama gromobranske zaštite		
			Štapni gromobrani na portalima TS (god)	Štapni gromobrani na portalima niženaponskog nivoa i gromobranska užad na portalima višenaponskog nivoa TS (god.)	Gromobranska užad na portalima TS (god)
Vodovi 220 i 110 kV sa portalnim stubovima	220kV/110kV	1050/550	>20000	>20000	>20000
		950/550	>20000	>20000	>20000
		850/550	>20000	>20000	>20000
		750/450	>7200	>7200	>3800
		650/450	>7200	>7200	>3800
Vodovi 220 sa portalnim stubovima i 110 kV sa stubovima jela	220kV/110kV	1050/550	>20000	>20000	>20000
		950/550	>20000	>20000	>20000
		850/550	>20000	>20000	>20000
		750/450	>16000	>16000	>9100
		650/450	>16000	>16000	>9100
Vodovi 400 kV i 110 kV sa portalnim stubovima	400kV/110kV	1425/550	>20000	>20000	>20000
		1300/550	>20000	>20000	>20000
		1175/450	>7200	>7200	>3800
		1050/450	>7200	>7200	>3800
Vodovi 400 kV sa portalnim stubovima i 110 sa stubovima jela	400kV/110kV	1425/550	>20000	>20000	>20000
		1300/550	>20000	>20000	>20000
		1175/450	>16000	>16000	>9100
		1050/450	>16000	>16000	>9100
Vodovi 400 kV sa portalnim ili Y stubovima i 220 kV sa portalnim stubovima	400kV/220kV	1425/1050	>20000	>20000	>20000
		1425/950	>20000	>20000	>20000
		1300/850	>20000	>20000	>20000
		1175/750	>20000	>20000	>20000
		1050/650	>20000	>20000	>20000

Tabela 11.1.4.4.2. Prosečni intervali vremena (T_f) između dva uzastopna proboja fazne izolacije namotaja transformatora 400 kV/220 kV, 400 kV/110 kV i 220 kV/110 kV zaštićenih metaloksidnim odvodnicima prenapona sa dužim rastojanjem odvodnik prenapona-transformator po faznom provodniku, pri propagaciji atmosferskih prenapona nadzemnim vodovima 400 kV, 220 kV i 110 kV u konfiguraciji B TS sa različitim varijantama gromobranske zaštite.

Nadzemni vodovi koji se susište na sabirnicama TS	Transformator	Standardni podnosivi atmosferski udarni naponi višeg ($U_{p,v}$) i nižeg ($U_{p,n}$) naponskog nivoa $U_{p,v}/U_{p,n}$ (kV/kV)	Prosečni intervali vremena (T_f) između dva uzastopna proboja fazne izolacije namotaja transformatora sa različitim varijantama gromobranske zaštite		
			Štapni gromobrani na portalima TS (god)	Štapni gromobrani na portalima niženaponskog nivoa i gromobranska užad na portalima višenaponskog nivoa TS (god.)	Gromobranska užad na portalima TS (god)
Vodovi 220 i 110 kV sa portalnim stubovima	220kV/110kV	1050/550	>20000	>20000	>20000
		950/550	>20000	>20000	>20000
		850/550	>20000	>20000	>20000
		750/450	>4500	>4500	>2500
		650/450	>4500	>4500	>2500
Vodovi 220 sa portalnim stubovima i 110 kV sa stubovima jela	220kV/110kV	1050/550	>20000	>20000	>20000
		950/550	>20000	>20000	>20000
		850/550	>20000	>20000	>20000
		750/450	>10000	>10000	>5000
		650/450	>10000	>10000	>5000
Vodovi 400 kV i 110 kV sa portalnim stubovima	400kV/110kV	1425/550	>20000	>20000	>20000
		1300/550	>20000	>20000	>20000
		1175/450	>4500	>4500	>2500
		1050/450	>4500	>4500	>2500
Vodovi 400 kV sa portalnim stubovima i 110kV sa stubovima jela	400kV/110kV	1425/550	>20000	>20000	>20000
		1300/550	>20000	>20000	>20000
		1175/450	>10000	>10000	>5000
		1050/450	>10000	>10000	>5000
Vodovi 400 kV sa portalnim ili Y stubovima i 220 kV sa portalnim stubovima	400kV/220kV	1425/1050	>20000	>20000	>20000
		1425/950	>20000	>20000	>20000
		1300/850	>20000	>20000	>20000
		1175/750	>20000	>20000	>20000
		1050/650	>20000	>20000	>20000

11.1.4.5. Parametri pouzdanosti izolacije namotaja transformatora pri delovanju svih uticajnih skupova atmosferskih prenapona

Na osnovu prosečnih intervala vremena između dva uzastopna proboja fazne (T_f) izolacije namotaja transformatora 400 kV/220 kV, 400 kV/110 kV i 220 kV/110 kV, utvrđenih za svaki (i -ti) karakteristični skup atmosferskih prenapona, datih u tabelama 11.1.4.1.3., 11.1.4.2.4., 11.1.4.2.5., 11.1.4.2.6., 11.1.4.3.1., 11.1.4.4.1. i 11.1.4.4.2., izračunati su očekivani godišnji brojevi proboja (N_u) i prosečni intervali vremena između dva uzastopna proboja (T_u) fazne izolacije namotaja transformatora za delovanje svih k uticajnih skupova atmosferskih prenapona pomoću sledećih izraza:

$$N_u = \sum_{i=1}^k \frac{1}{T_{f,i}}, \quad (11.1.4.5.1.)$$

$$T_u = \frac{1}{N_u} = \frac{1}{\sum_{i=1}^k \frac{1}{T_{f,i}}}. \quad (11.1.4.5.2.)$$

$T_{f,i}$ - prosečni interval vremena između dva uzastopna proboja fazne izolacije namotaja transformatora pri delovanju prenapona i -tog skupa.

Prosečni intervali vremena između dva uzastopna proboja fazne izolacije namotaja transformatora uslovljeni svim skupovima atmosferskih prenapona su dati u tabeli 11.1.4.5.1. Isti važe i za konfiguraciju A i za konfiguraciju B TS, jer su razlike u rezultatima male (maksimalno do 5%).

Rezultati dati u tabeli 11.1.4.5.1. su utvrđeni za izolacije čiji preskočni (probojni) naponi ostaju isti u celom životnom veku. Uvažavajući starenje i druge nepoznate faktore koji dovode do spuštanja podnosivih napona izolacije, i koeficijent visinske korekcije za prosečnu nadmorsku visinu od 400 m (sniženje 50% preskočnih napona spoljašnje izolacije za 10% i 50% probojnih napona unutrašnje izolacije za 15%) ustanovljeni su prosečni intervali vremena između dva uzastopna proboja fazne izolacije namotaja transformatora uslovljeni svim skupovima atmosferskih prenapona i dati u tabeli 11.1.4.5.2.

Iz ustanovljenih parametara pouzdanosti izolacije namotaja transformatora pri ukupnom delovanju atmosferskih prenapona je uočeno da preskoci na niženaponskim izolatorima portala iznad transformatora pri udaru groma u njega, u većini slučajeva bitno doprinose uvećanju očekivanog godišnjeg broja proboja, odnosno smanjenju prosečnog intervala vremena između dva uzastopna proboja fazne izolacije namotaja transformatora. Zato su utvrđeni i prosečni intervali vremena između dva uzastopna proboja fazne izolacije namotaja transformatora uslovljeni svim atmosferskim prenaponima, kada su samo na portalu iznad transformatora umesto izolatorskih lanaca nižeg napona postavljeni izolatorski lanci višeg napona, uzimajući u obzir koeficijent sigurnosti koji uvažava starenje i druge nepoznate faktore koji dovode do spuštanja podnosivih napona izolacije i koeficijent visinske korekcije za prosečnu nadmorsku visinu od 400 m (sniženje 50% preskočnih napona spoljašnje izolacije za 10% i 50% probojnih napona unutrašnje izolacije za 15%), i dati takođe, u tabeli 11.1.4.5.2.

Analiza rezultata istraživanja parametara pouzdanosti izolacije namotaja transformatora 400 kV/220 kV, 400 kV/110 kV i 220 kV/110 kV pri delovanju svih skupova atmosferskih prenapona ukazuje na sledeće:

- Izolaciju namotaja transformatora je neophodno štititi odvodnicima prenapona priključenim što bliže provodnim izolatorima transformatora.
- Gromobranska užad u TS, posebno sa obe strane portala iznad transformatora, su najbolje i pravo rešenje za gromobranksu zaštitu.

- Izborom izolatorskih lanaca niženaponskog nivoa portala iznad transformatora sa višim podnosivim udarnim naponima (izolatorski lanci sa većim brojem članaka) u većini slučajeva doprinosi bitnom smanjenju očekivanog godišnjeg broja proboja izolacije namotaja transformatora.
- Zaštita samo štapnim gromobranima ne omogućuje zadovoljavajuću pouzdanost rada izolacije namotaja transformatora, sa uvažavanjem njenog starenja, ni za najviše podnosive atmosferske udarne napone, iako je zaštićena metaloksidnim odvodnicima prenapona priključenim na relativno kratkom rastojanju po faznom provodniku od provodnih izolatora transformatora (15 m na strani 400 kV, 9 m na 220 kV i 8 m na 110 kV).
- Zaštita TS gromobranskim užadima i zaštita transformatora metaloksidnim odvodnicima prenapona priključenim na relativno kratkom rastojanju po faznom provodniku od provodnih izolatora (15 m na strani 400 kV, 9 m na 220 kV i 8 m na 110 kV), omogućuje zadovoljavajuću pouzdanost rada izolacije namotaja transformatora 400 kV/220 kV i 220 kV/110 kV, sa uvažavanjem njenog starenja, i za najniže podnosive udarne napone; za transformator 400 kV/110 kV ista zaštita ne omogućava zadovoljavajuću pouzdanost za izolacije namotaja podnosivih udarnih napona 1175 kV/450 kV i 1050 kV/450 kV. Izborom izolatorskih lanaca niženaponskog nivoa portala iznad transformatora sa višim podnosivim udarnim naponima, jednakim podnosivim udarnim naponima višenaponskih izolatorskih lanaca TS, uz napred navedenu gromobransku i prenaponsku zaštitu, ostvaruje se zadovoljavajuća pouzdanost rada izolacije namotaja transformatora 400 kV/110 kV, čak i za najniže podnosive udarne napone (za izolaciju namotaja 1050 kV/450 kV parametri pouzdanosti su u blizini granica prihvatljivosti).

Tabela 1.4.5.1. Prosečni intervali vremena (T_{ij}) između dva uzastopna proboja fazne izolacije namotaja transformatora 400 kV/220 kV, 400 kV/110 kV i 220 kV/110 kV zaštićenih metaloksidnim odvodnicima prenapona na kraćem (KR) i dužem (DR) rastojanju odvodnik prenapona-transformator po faznom provodniku, pri delovanju svih skupova atmosferskih prenapona za različite varijante gromobranske zaštite u TS.

Transformator	Standardni podnosivi atmosferski udarni naponi višeg ($U_{p,V}$) i nižeg ($U_{p,N}$) naponskog nivoa $U_{p,V}/U_{p,N}$ kV/kV	Prosečni intervali vremena (T_{ij}) između dva uzastopna proboja izolacije namotaja transformatora za različite varijante gromobranske zaštite TS					
		Štapni gromobrani na portalima TS		Štapni gromobrani na portalima niženaponskog nivoa i gromobranska užad na portalima višenaponskog nivoa TS		Gromobranska užad na portalima TS	
		KR (god)	DR (god)	KR (god)	DR (god)	KR (god)	DR (god)
220 kV/110 kV	1050/550	>500	>260	>550	>350	>3000	>2400
	950/550	>440	>230	>550	>350	>3000	>2400
	850/550	>290	>200	>550	>340	>3000	>2100
	750/550	>250	>170	>490	>300	>1700	>1200
	750/450	>140	>110	>210	>160	>850	>500
	650/450	>110	>90	>190	>150	>630	>400
400 kV/110 kV	1425/550	>280	>150	>350	>210	>1300	>1000
	1300/550	>230	>130	>350	>210	>1300	>1000
	1175/550	>190	>120	>350	>210	>1300	>1000
	1175/450	>110	>80	>150	>120	>470	>320
	1050/450	>100	>70	>140	>110	>400	>270
400 kV/220 kV	1425/1050	>1600	>560	>3600	>970	>4200	>4000
	1425/950	>970	>430	>1500	>680	>4000	>3600
	1300/850	>330	>240	>580	>430	>3800	>2700
	1175/750	>200	>150	>360	>300	>2800	>1800
	1050/650	>110	>100	>190	>160	>980	>640

Tabela 11.1.4.5.2. Prosečni intervali vremena (T_u) između dva uzastopna proboja fazne izolacije namotaja transformatora 400 kV/220 kV, 400 kV/110 kV i 220 kV/110 kV zaštićenih metaloksidnim odvodnicima prenapona na kraćem (KR) i dužem (DR) rastojanju odvodnik prenapona-transformator po faznom provodniku, uslovljeni svim skupovima atmosferskih prenapona za različite varijante gromobranske zaštite i sa uvažavanjem starenja izolacije i visinske korekcije (sniženje 50% preskočnih napona spoljašnje izolacije za 10% i 50% probojnih napona unutrašnje izolacije za 15%).

Transformator	Standardni podnosivi atmosferski udarni naponi višeg ($U_{p,V}$) i nižeg ($U_{p,N}$) naponskog nivoa $U_{p,V}/U_{p,N}$ kV/kV		Prosečni intervali vremena (T_u) između dva uzastopna proboja izolacije namotaja transformatora za različite varijante gromobranske zaštite TS					
			Štapni gromobrani na portalima TS		Štapni gromobrani na portalima niženaponskog nivoa i gromobranska užad na portalima višenaponskog nivoa TS		Gromobranska užad na portalima TS	
			izolatorski lanci portala iznad transformatora	izolatorski lanci TS i izolacija namotaja transformatora	KR (god)	DR (god)	KR (god)	DR (god)
220 kV/110 kV	1050/550		>250	>220	>330	>280	>2100	>1600
	950/550		>230	>190	>330	>280	>2100	>1600
	850/550		>190	>170	>330	>270	>1900	>1500
	750/550		>160	>140	>300	>260	>1300	>1100
	750/450		>110	>100	>160	>140	>690	>510
	650/450		>95	>85	>150	>130	>530	>390
	1050/1050	1050/550	>280	>240	>360	>300	>2300	>1800
	950/950	950/550	>250	>210	>360	>300	>2300	>1800
	850/850	850/550	>200	>180	>350	>290	>2000	>1600
	750/750	750/550	>170	>150	>320	>270	>1300	>1200
	750/750	750/450	>120	>110	>170	>150	>750	>550
650/650	650/450	>98	>90	>160	>140	>560	>410	
400 kV/110 kV	1425/550		>160	>140	>240	>200	>1000	>950
	1300/550		>150	>130	>240	>200	>1000	>950
	1175/550		>130	>110	>240	>200	>1000	>950
	1175/450		>90	>80	>120	>110	>420	>330
	1050/450		>80	>74	>110	>100	>360	>280
	1425/1425	1425/550	>240	>210	>350	>300	>2100	>1800
	1300/1300	1300/550	>210	>190	>350	>300	>2100	>1800
	1175/1175	1175/550	>170	>150	>350	>300	>2100	>1800
	1175/1175	1175/450	>110	>100	>180	>160	>740	>580
	1050/1050	1050/450	>100	>95	>160	>150	>560	>450
400 kV/220 kV	1425/1050		>420	>360	>890	>780	>4200	>4100
	1425/950		>320	>290	>570	>520	>3800	>3700
	1300/850		>200	>180	>390	>340	>2900	>2700
	1175/750		>130	>110	>250	>210	>1400	>1100
	1050/650		>96	>85	>150	>120	>610	>460
	1425/1425	1425/1050	>490	>430	>1000	>900	>4200	>4000
	1425/1425	1425/950	>370	>320	>660	>580	>4200	>4000
	1300/1300	1300/850	>230	>200	>440	>370	>3500	>3200
	1175/1175	1175/750	>150	>130	>280	>250	>1700	>1400
	1050/1050	1050/650	>110	>95	>170	>140	>680	>530

11.2. Koordinacija izolacije objekata 400 kV, 220 kV i 110 kV u oblasti sklopnih prenapona

11.2.1. Prethodna razmatranja

Sklopni prenaponi, zajedno sa atmosferskim, predstavljaju osnovu za korektan i racionalan izbor električnih karakteristika izolacije visokonaponskih objekata. Prenaponski procesi, koji se javljaju pri uključenju i isključenju prekidača, pored karakteristika sistema napajanja (mreže) i dela sistema koji se uključuje ili isključuje (konfiguracije), zavise i od karakteristika prekidača. Idealan prekidač sa aspekta prenapona je bez prethodnih paljenja električnog luka u procesu uključivanja, bez ponovnih paljenja električnog luka u procesu isključenja i prekida struju pri njenom prolasku kroz prirodnu nulu (nema sečene struje). Međutim, idealnog prekidača nema, te su prethodno navedene pojave prisutne u većoj ili manjoj meri.

U mrežama visokih napona, pa i u mrežama 400 kV, 220 kV i 110 kV Srbije, uticajni skupovi prenapona, skupovi koji bitno utiču na pouzdanost rada mreža, su sledeći:

- skupovi prenapona pri uključenju neopterećenih nadzemnih i kablovskih vodova,
- skupovi prenapona pri jednofaznom automatskom ponovnom uključenju (1APU) nadzemnih vodova,
- skupovi prenapona pri trofaznom automatskom ponovnom uključenju (3APU) nadzemnih vodova,
- skupovi prenapona pri uključenju energetskih transformatora,
- skupovi prenapona pri isključenju neopterećenih energetskih transformatora, ako dolazi do pojava ponovnog paljenja električnog luka između kontakta prekidača ili rezanja struje pre njenog prolaska kroz prirodnu nulu,
- skupovi prenapona pri isključenju neopterećenih nadzemnih i kablovskih vodova, ako dolazi do pojava ponovnog paljenja električnog luka između kontakta prekidača.

Napred navedeni skupovi prenapona su istraživani u karakterističnim konfiguracijama mreža 400 kV, 220 kV i 110 kV prethodne i sadašnje Jugoslavije. Izvršena su eksperimentalna istraživanja prenapona i proračuni istih koristeći programski paket EMTP-ATP. Na osnovu rezultata eksperimentalnih istraživanja izvršena je verifikacija rezultata proračuna. Konstatovano je da su prenaponi dobijeni proračunom nešto viši od istih dobijenih eksperimentalnim istraživanjem; razlike su u proseku nekoliko procenata. Međutim, iako su razlike male, izračunati rizici na osnovu prenapona dobijenih proračunom u određenim konfiguracijama i pri određenim operacijama mogu biti i nekoliko puta veći od stvarnih. Osnove postavke korišćene u proračunu bile su sledeće:

- Nadzemni vodovi su predstavljeni raspoređenim frekventno zavisnim parametrima pomoću talasnih impedansi i brzina prostiranja za direktni i nulti redosled. Podeljeni su na više deonica i prenaponi su računati na početku voda i na kraju svake deonice.
- Energetski transformatori su predstavljeni matricom induktansi dobijenom na osnovu podataka o transformatoru (snaga, odnos transformacije, struja praznog hoda, napon kratkog spoja i karakteristika magnećenja) i kapacitivnostima namotaja međusobno i prema masi.
- Mreža, preko koje je napajana istraživana konfiguracija, je ekvivalentirana u susednim TS pomoću generatora naizmeničnog napona i odgovarajućih impedansi. Oni su određeni na osnovu parametara mreže u normalnom radu kada je isključena istraživana konfiguracija. Ovakvim ekvivalentiranjem postiže se veća tačnost nego ekvivalentiranjem mreže u TS u kojoj se vrše sklopne operacije.
- Izvedeno je po 200 operacija uključivanja za utvrđivanje skupova prenapona pri uključenju u svakoj razmatranoj konfiguraciji. Monte Karlo simulacijom iz pretpostavljene normalne raspodele vremena uključivanja polova prekidača birana su vremena uključivanja. Srednje vreme uključivanja polova prekidača (najčešće je to bio trenutak maksimuma jednog od faznih napona) je isto za sve tri faze. Kao standardno odstupanje vremena uključivanja polova prekidača usvojeno je $\sigma=1.8$ ms.

Izuzetak su bila 1APU kod kojih su vremena uključenja birana iz ravnomerne raspodele vremena uključenja polova prekidača.

- Razmatranje je izvršeno za suvu i vlažnu izolaciju nadzemnih vodova 400 kV i 400 kV dela TS podnosivih sklopnih udarnih faznih napona ($U_{s,f,p}$): 1050 kV, 950 kV i 850 kV i podnosivih sklopnih udarnih međufaznih napona ($U_{s,mf,p}$): 1575 kV, 1425 kV i 1360 kV. 50% preskočni sklopni naponi suve ($U_{50,s}$) i vlažne ($U_{50,v}$) jedinične izolacije su određeni iz izraza:

$$U_{50,s} = \frac{U_{s,p}}{1 - 1.282\sigma} \quad (11.2.1.1.)$$

$$U_{50,v} = \frac{0.9U_{s,p}}{1 - 1.282\sigma} \quad (11.2.1.2.)$$

Ovde su: $U_{s,p}$ - nazivni podnosivi sklopni udarni fazni ($U_{s,f,p}$), odnosno međufazni ($U_{s,mf,p}$) napon jedinične izolacije (podnosivi naponi su statistički 10% preskočni naponi izolacije),

σ - standardno odstupanje od napona $u_{50,s}$ i $u_{50,v}$; usvojeno je $\sigma=5\%$ (ovo je vrednost koja se usvaja za laboratorijske uslove ispitivanja).

Pretpostavljeno je da vlažna izolacija ima za 10% niže podnosive sklopne udarne napone nego suva izolacija. Za krive efekta spoljašnje izolacije sa napred utvrđenim $U_{50,s}$ i $U_{50,v}$, usvojeno je pogonsko standardno odstupanje $\sigma=8\%$. Pretpostavljeno je da krive efekta važe za sve oblike sklopnih prenapona. Parametri krivih efekta za suvu i vlažnu izolaciju su dati u tabeli 11.2.1.1. Kada se uzmu u obzir koeficijent sigurnosti, koji uvažava starenje i neke druge nepoznate faktore koji spuštaju podnosive napone izolacije, i koeficijent visinske korekcije za prosečnu nadmorsku visinu objekta od 400 m, vrednosti parametara krivih efekta za suvu i vlažnu faznu izolaciju dati u tabeli 11.2.1.1. se umanjuju za 10%, a za međufaznu izolaciju za 5%.

- Nazivni podnosivi sklopni udarni naponi nisu definisani u propisima za izolaciju nadzemnih vodova 220 kV i 110 kV, kao i za izolaciju 220 kV i 110kV dela TS. Procenjeni su na osnovu podataka o naizmeničnim kratkotrajnim podnosivim naponima industrijske frekvencije na kiši ($U_{n,p}$) za izolaciju istih mreža. Za mrežu 220 kV to su naponi: 275 kV, 325 kV, 360 kV, 395 kV i 460 kV i za mrežu 110 kV naponi: 185 kV i 230 kV. Podnosivi sklopni napon spoljašnje izolacije za određene oblike talasa može da bude niži od temene vrednosti podnosivog naizmeničnog napona čak i više od 10%. Pretpostavljeno je da je $U_{s,p,3\sigma} = \sqrt{2} \cdot 0.9U_{n,p}$ ($U_{n,p}$ je efektivna vrednost podnosivog napona) sklopni napon koji izolacija izdržava na kiši sa znatnom verovatnoćom (to je napon niži od 50% preskočnog napona za trostruko standardno odstupanje i verovatnoća preskoka pri istom je 0.00135, odnosno verovatnoća da će izolacija isti izdržati je 0.99865). 50% preskočni sklopni fazni naponi suve ($U_{50,s}$) i vlažne ($U_{50,v}$) jedinične izolacije, uvažavajući starenje i koeficijent visinske korekcije za prosečnu nadmorsku visinu objekta od 400 m, su utvrđeni iz izraza:

$$U_{50,s} = \frac{U_{s,p,3\sigma}}{1 - 3\sigma} = \frac{0.9\sqrt{2}U_{n,p}}{1 - 3\sigma} \quad (11.2.1.3.)$$

$$U_{50,v} = \frac{0.9 \cdot U_{s,p,3\sigma}}{1 - 3\sigma} = \frac{0.81\sqrt{2}U_{n,p}}{1 - 3\sigma} \quad (11.2.1.4.)$$

σ - standardno odstupanje napona od njegove srednje vrednosti $U_{50,s}$ i $U_{50,v}$; usvojeno je $\sigma=5\%$.

Kao 50% preskočni sklopni međufazni naponi za suvu i vlažnu izolaciju su usvojeni naponi viši za 40% do 50% preskočnih sklopnih faznih napona.

Za krive efekta spoljašnje izolacije sa napred utvrđenim $U_{50,v}$ u pogonskim uslovima usvojeno je standardno odstupanje $\sigma=8\%$. Pretpostavljeno je da krive efekta važe za sve oblike sklopnih

prenapona. Razmatranje je izvršeno za sve standardizovane stupnjeve izolacije za mreže 220 kV i 110kV. Parametri krivih efekta za suhu i vlažnu faznu izolaciju su dati u tabeli 11.2.1.1.

- Krive efekta unutrašnje izolacije energetskih transformatora za sklopne prenapone su nepoznate. Pretpostavlja se da su podnosivi sklopni naponi izolacije namotaja transformatora najmanje jednaki podnosivim sklopnim naponima odgovarajuće spoljašnje izolacije i te vrednosti su usvojene kao vrednosti 10% probojnih napona izolacije namotaja transformatora. 50% probojni naponi fazne i međufazne izolacije su određeni iz izraza (11.2.1.2.) za 400 kV namotaj transformatora usvajajući standardno odstupanje $\sigma=8\%$, a za 220 kV i 110 kV namotaje iz izraza (11.2.1.3.) usvajajući isto σ . Parametri krivih efekata unutrašnje izolacije namotaja transformatora su dati u tabeli 11.2.1.1. Kada se uzme u obzir koeficijent sigurnosti, koji uvažava starenje i neke druge nepoznate faktore koji spuštaju podnosive napone izolacije, vrednosti parametara krivih efekata fazne i međufazne izolacije namotaja transformatora, date u tabeli 11.2.1.1. se umanjuju za 15%.

Opređenju za 200 operacija uključenja prethodilo je razmatranje rizika preskoka na neopterećenom nadzemnom vodu 400 kV dužine 152 km. Pošto su na istom vodu izvršena obimna eksperimentalna istraživanja sklopnih prenapona prethodno je izvršena verifikacija rezultata proračuna. Izvršeno je 1000 operacija uključenja neopterećenog voda i verovatnoća preskoka je računata za svaku operaciju. Razmatrana je izolacija voda nazivnih podnosivih sklopnih udarnih napona 950 kV i 850 kV. Vrednost rizika preskoka uzoraka je posmatrana posle svakog izvedenog uključenja, tj. za sve uzorke čiji se članovi povećavaju za po 1 član počev od 1 do j. Računata je iz sledećeg izraza:

$$R_{uz.j} = \frac{\sum_{i=1}^j P_i}{j} \quad (11.2.1.5)$$

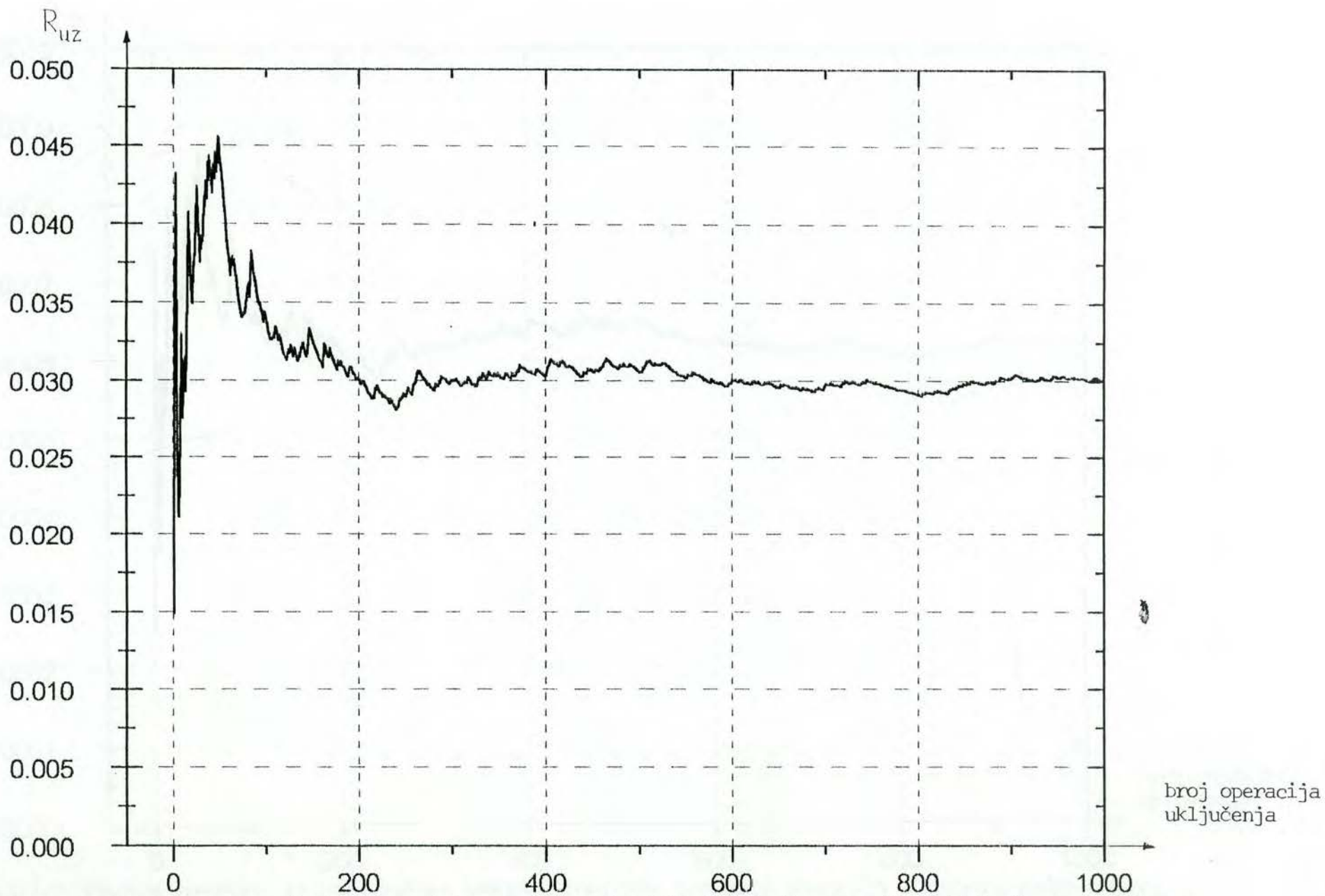
Ovde su: P_i - verovatnoća preskoka pri i-toj operaciji uključenja,

j - broj operacija uključenja posle kojih se razmatra vrednost rizika preskoka uzorka ($j=1$ do 1000).

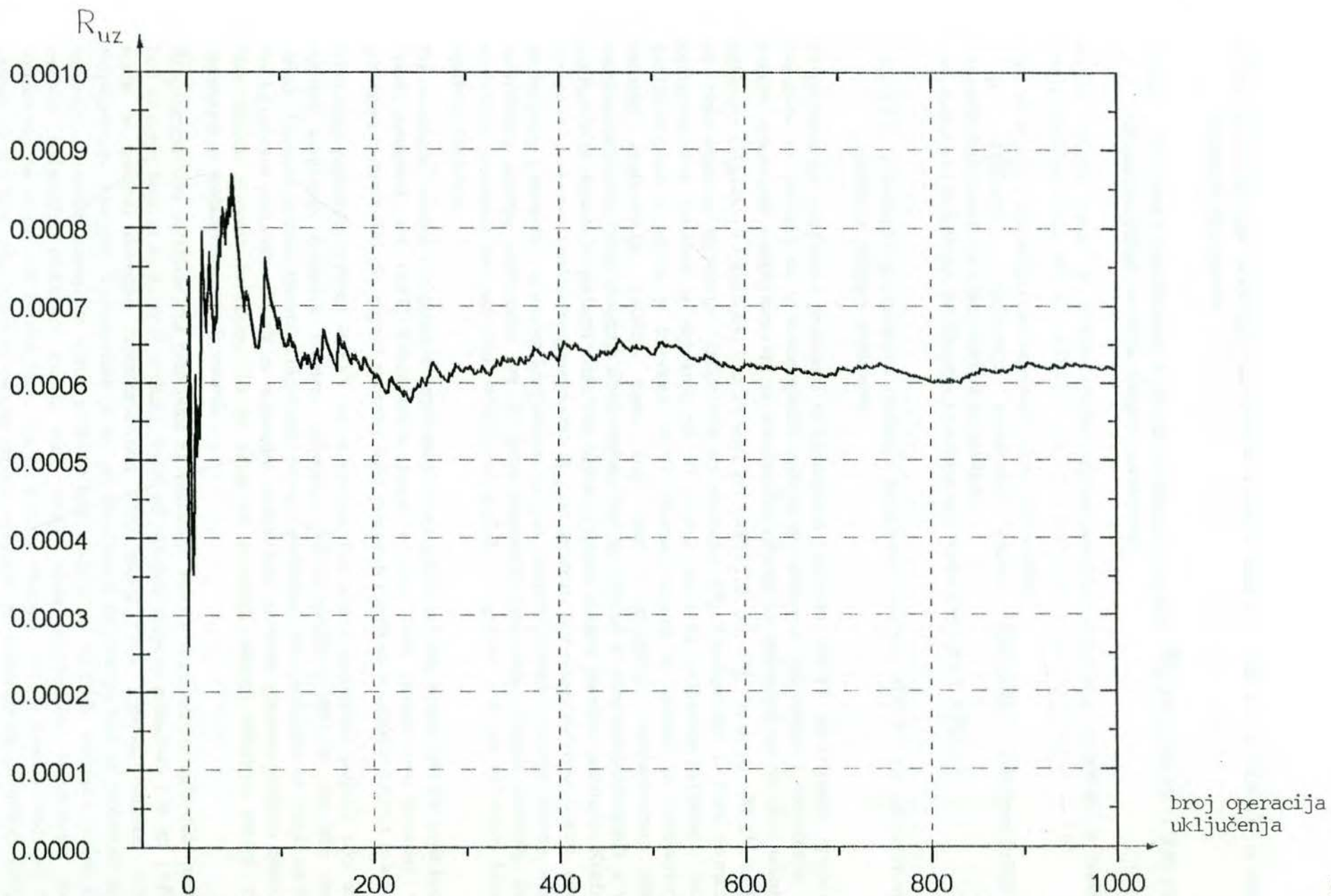
Promene vrednosti rizika preskoka uzorka u toku 1000 izvedenih operacija uključenja za izolaciju voda 950 kV i 850 kV su date na sl. 11.2.1.1. i 11.2.1.2. Uočava se da promene vrednosti rizika preskoka uzorka posle 200 članova - operacija uključenja ne prelaze 10% od vrednosti rizika preskoka utvrđene posle 1000 operacija uključenja. Može se smatrati da je 200 operacija uključenja zadovoljavajući broj na osnovu koga se može pouzdano utvrditi vrednost rizika preskoka. Posmatranje rizika preskoka je izvršeno i na uzorku sa po 50 slučajno izabranih operacija uključenja. Odstupanja vrednosti rizika preskoka tako formiranih uzoraka od vrednosti rizika preskoka uzorka nakon 1000 operacija uključenja, kretala su se i do 50%. Ovo se za određene konfiguracije može tolerisati, te se uzorak dobijen za 50 operacija uključenja može smatrati adekvatnim za procenu rizika preskoka u tim konfiguracijama.

Tabela 11.2.1.1. Parametri krivih efekta spoljašnje izolacije u mrežama 400 kV, 220 kV i 110 kV i unutrašnje izolacije namotaja energetskih transformatora

MREŽA	Standardni kratkotrajni podnosivi napon industrijske frekvencije $U_{n,p}$ (kV _{eff})	Podnosivi sklopni udarni napon $U_{s,p}$ (kV _p)	Parametri krivih efekta					
			spoljašnja izolacija				unutrašnja izolacija	
			suha		vlažna		U_{50} kV	σ kV
$U_{50,s}$ kV	σ kV	$U_{50,v}$ kV	σ kV					
400 kV		1575	1683	134.6	1515	121.2	1755	140.4
		1425	1523	121.8	1371	109.7	1588	127
		1360	1453	116.2	1308	104.6	1515	121.2
		1050	1122	89.8	1010	80.8	1170	93.4
		950	1015	81.2	914	73.1	1059	84.7
		850	908	72.6	817	65.4	947	75.8
220 kV	275		412	33	371	29.7	460	36.8
	325		487	39	438	35	544	43.5
	360		539	43.1	485	38.8	603	48.2
	395		591	47.3	532	42.6	662	52.9
	460		688	55	620	49.6	770	61.6
110 kV	185		277	22.2	249	19.9	310	24.8
	230		345	27.6	310	24.8	385	30.8



Sl. 11.2.1.1. Promene vrednosti rizika preskoka uzorka u toku 1000 izvedenih operacija uključenja neopterećenog nadzemnog voda 400 kV dužine 152 km sa izolacijom podnosivih sklopnih udarnih faznih napona 850 kV_{tv}



Sl. 11.2.1.2. Promene vrednosti rizika preskoka uzorka u toku 1000 izvedenih operacija uključenja neopterećenog nadzemnog voda 400 kV dužine 152 km sa izolacijom podnosivih sklopnih udarnih faznih napona 950 kV_{tv}

11.2.2. Koordinacija izolacije nadzemnih vodova 400 kV, 220 kV i 110 kV u oblasti sklopnih prenapona

11.2.2.1. Parametri pouzdanosti izolacije nadzemnih vodova 400 kV, 220 kV i 110 kV za eksperimentima utvrđene sklopne prenapone

Institut "Nikola Tesla" je izvršio obimna eksperimentalna istraživanja prenapona u različitim konfiguracijama mreža 400 kV, 220 kV i 110 kV u prethodnoj i sadašnjoj Jugoslaviji i to:

- pri uključenju i isključenju neopterećenih nadzemnih vodova,
- pri uključenju i isključenju nadzemnih vodova opterećenih transformatorom ili autotransformatorom sa i bez reaktora na tercijeru,
- pri nastanku i isključenju zemljospoja na nadzemnim vodovima i pri 1 APU.

11.2.2.1.1. Parametri pouzdanosti izolacije nadzemnih vodova 400 kV za eksperimentima utvrđene sklopne prenapone

Eksperimentalna istraživanja prenapona na nadzemnim vodovima 400 kV pri sklopnim operacijama prekidača su izvršena na 9 neopterećenih vodova pri njihovom uključenju i isključenju, na 8 vodova opterećenih transformatorom ili autotransformatorom sa reaktorom na tercijeru takođe pri njihovom uključenju i isključenju i na tri voda pri 1APU [26, 36, 47]. Prekidači 400 kV, sa kojim su vršene operacije uključenja i isključenja, su malouljni, SF₆ i pneumatski. U svim razmatranim konfiguracijama izvršeno je najmanje po 10 ciklusa operacija uključenje-isključenje, osim u konfiguracijama u kojima je izvedeno 1APU. Prelazni naponi su snimani na karakterističnim mestima konfiguracija: početak voda, kraj voda i priključci transformatora, odnosno autotransformatora. Pored prelaznih faznih napona koji su snimani u svim konfiguracijama, u većini konfiguracija snimani su prelazni međufazni naponi i naponi između kontakta prekidača. Koeficijent faznog (k_f), odnosno međufaznog prenapona (k_{mf}) je definisan kao odnos najvišeg faznog, odnosno međufaznog prenapona i prinudne komponente, to jest ustaljene temene vrednosti faznog, odnosno međufaznog napona neposredno pre ili posle komutacije prekidača. Najviši izmereni fazni i međufazni prenaponi na vodovima 400 kV su $k_f=2.28$ i $k_{mf}=2.00$ i to na njihovom kraju pri operaciji uključenja.

Pri nastajanju, trajanju i isključenju zemljospoja ni na jednoj od faza mreže 400 kV nisu izmereni visoki prenaponi. Pri 1APU (beznaponska pauza je reda 0.9s), takođe nisu izmereni visoki prenaponi u mreži 400 kV; najviši izmereni fazni prenapon (izvršeno je samo 7 1APU) je $k_f=1.62$.

Uključenja prekidača u mreži 400 kV su se odvijala bez pojave prethodnih paljenja luka između njihovih kontakata. Rasipanje vremena uključenja polova prekidača 400 kV nije bilo izuzetno veliko. Vremena između trenutaka uključenja prvog i poslednjeg pola prekidača su manja od 9 ms. Pri isključenju prekidača 400 kV ni u jednom slučaju nisu utvrđena ponovna paljenja električnog luka između njihovih kontakata. To je jedan od osnovnih razloga odsustva pojave visokih prenapona na izolaciji nadzemnih vodova.

Eksperimentalnim istraživanjima prenapona na vodovima 400 kV sagledani su uglavnom prenaponi koji se mogu pojaviti na njihovoj izolaciji. Jedan od uticajnih skupova prenapona i to pri 1APU, ne može se smatrati dovoljno reprezentativnim zbog malog broja članova, odnosno izvršenih eksperimenata. Međutim, konstatovano je da, pri obostranom isključenju faza sa prolaznim zemnim spojevima, preostali naponi na njima relativno brzo padaju, pa su posle nekoliko stotina ms od trenutka isključenja praktično jednaki nuli; ostaje samo naizmenična komponenta napona, indukovana od ostale dve zdrave faze, čija je temena vrednost 10-15% temene vrednosti faznog napona zdravih faza. Ako nema preostalog napona prenaponi pri jednofaznom ponovnom uključenju faze, na kojoj je bio zemljospoj, su manje uticajni od onih koji se javljaju pri normalnom uključenju istog neopterećenog voda.

Koristeći podatke o izmerenim vrednostima faznih i međufaznih prenapona na krajevima nadzemnih vodova u istraživanim konfiguracijama, izračunati su rizici preskoka na istim za podnosive sklopne udarne fazne napone: 1050 kV_{tv}, 950 kV_{tv} i 850 kV_{tv} i njima odgovarajuće podnosive sklopne udarne međufazne napone: 1575 kV_{tv}, 1425 kV_{tv} i 1360 kV_{tv}.

Pretpostavljajući da prenaponi izmereni na kraju voda deluju na celokupnu izolaciju istog, rizici preskoka su izračunati iz sledećeg izraza:

$$R_{p,V} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left\{ 1 - \left[(1 - P_{0,i})(1 - P_{4,i})(1 - P_{8,i}) \right]^n \left[(1 - P_{0-4,i})(1 - P_{4-8,i})(1 - P_{8-0,i}) \right]^{\frac{2}{3}r} \right\} \quad (11.2.2.1.1.1.)$$

Ovde su:

N - broj izvedenih operacija (uključenja ili isključenja) prekidača voda,

n - broj izolatorskih lanaca po fazi voda,

r - broj raspona (rastojanja između dva susedna stuba) na vodu (međufaznu jediničnu izolaciju predstavlja vazdušno rastojanje između dve faze na jednom rasponu voda),

$P_{0,i}$, $P_{4,i}$, $P_{8,i}$ - verovatnoća preskoka pri pojavi prenapona na fazama 0,4 i 8 na kraju voda pri i-toj operaciji prekidača,

$P_{0-4,i}$, $P_{4-8,i}$, $P_{8-0,i}$ - verovatnoća preskoka pri pojavi prenapona između faza 0-4, 4-8 i 8-0 na kraju voda pri i-toj operaciji prekidača.

Očekivani godišnji brojevi preskoka ($N_{p,V}$) i prosečni intervali vremena ($T_{p,V}$) između dva uzastopna preskoka izračunati su iz sledećih izraza:

$$N_{p,V} = R_{p,V} N_g \quad i \quad (11.2.2.1.1.2.)$$

$$T_{p,V} = \frac{1}{N_{p,V}} \quad . \quad (11.2.2.1.1.3.)$$

Ovde su:

$R_{p,V}$ - rizik preskoka na vodu izračunat iz izraza (11.2.2.1.1.1.),

N_g - broj očekivanih operacija prekidača voda godišnje (usvojeno $N_g=10$).

Verovatnoće preskoka $P_{0,i}$, $P_{4,i}$, $P_{8,i}$, $P_{0-4,i}$, $P_{4-8,i}$, $P_{8-0,i}$ su izračunate iz izraza:

$$P_i = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_0^{u_i} e^{-\frac{(u-u_{50})^2}{2\sigma^2}} du. \quad (11.2.2.1.1.4.)$$

Ovde su:

u_{50} , σ - parametri krivih efekta izolacija za mrežu 400 kV dati u tabeli 11.2.1.1. (uzeti su parametri krivih efekta za suhu izolaciju),

u_i - prenapon na jediničnoj faznoj ili međufaznoj izolaciji na kraju voda pri i-toj operaciji prekidača.

Konstatovano je da su rizici preskoka veoma niski za spregu podnosivih sklopnih faznih i međufaznih napona vodova 1050 kV_{tv} i 1575 kV_{tv}. Prosečna vremena između dva uzastopna preskoka usled komutacije osetno nadmašuju vek vodova, osim u slučaju uključenja iz HE "Đerdap" neopterećenog voda "Đerdap-Beograd" i istog voda opterećenog neopterećenim autotransformatorom u TS "Beograd 8", kada je snaga mreže u HE "Đerdap" veoma mala (mrežu su napajala samo dva generatora u HE "Đerdap"). Ove konfiguracije se u praksi ne koriste. Sprega podnosivih sklopnih faznih i međufaznih napona vodova 1050 kV_{tv} i 1575 kV_{tv} pruža vrlo visoku pouzdanost rada. Za spregu podnosivih sklopnih napona vodova 950 kV_{tv} i 1425 kV_{tv} rizici su, takođe, niski. Prosečna vremena između dva uzastopna preskoka su velika, praktično uvek iznad 5 godina, te ova sprega pruža potrebnu pouzdanost rada nadzemnih vodova napona 400 kV. Sprega podnosivih sklopnih faznih i međufaznih napona izolacije vodova 850 kV_{tv} i 1360 kV_{tv} dovodi do znatnih rizika, kada se pretpostavi, kao i za prethodno razmatrane sprege, da prenaponi izmereni na kraju vodova deluju na celokupnu izolaciju vodova. Ovakva pretpostavka za ovu spregu napona može da dovede do nepreciznih, pa i pogrešnih zaključaka o pouzdanosti rada vodova. Izračunati rizici su veći od stvarnih. To važi i za rizike izračunate za prethodno razmatrane sprege podnosivih

sklopnih napona vodova. Za iste je to, ipak, prihvatljivo, jer je i sa tako dobijenim povećanim rizicima pouzdanost rada vodova veoma visoka ili zadovoljavajuća.

11.2.2.1.2. Parametri pouzdanosti izolacije nadzemnih vodova 220 kV za eksperimentima utvrđene sklopne prenapone

Eksperimentalna istraživanja prenapona na nadzemnim vodovima 220 kV pri sklopnim operacijama prekidača su izvršena na 4 neopterećena voda pri njihovom uključenju i isključenju i na jednomvodu pri IAPU [54].

Prekidači sa kojima su vršene operacije uključenja i isključenja su malouljni. U svim razmatranim konfiguracijama izvršeno je od 4 do 12 ciklusa operacija uključenje - isključenje, osim u konfiguraciji u kojoj je izvedeno IAPU. Prelazni fazni naponi su snimani u tri konfiguracije na kraju voda i u jednoj na početku voda. Najviši izmereni fazni prenapon pri uključenju neopterećenog voda je $k_f=2.15$; izmeren je na njegovom kraju. U toku uključenja nije dolazilo do prethodnih paljenja električnog luka između kontakta prekidača. Rasipanje vremena uključenja polova nekih tipova prekidača je znatno; u nekim slučajevima dostiže 16 ms. U procesu isključenja kod malouljnih prekidača novijih konstrukcija, osim u jednom slučaju (kasnije je konstatovano da je prekidač imao nedozvoljeno rasipanje vremena isključenja polova prekidača), nije bilo ponovnih paljenja električnog luka, pa ni visokih prenapona. Stariji tipovi malouljnih prekidača dovode do ponovnih paljenja električnog luka, a time i do uticajnih prenapona, što je konstatovano u jednoj od konfiguracija. U njoj je izmeren najviši fazni prenapon pri operaciji isključenja $k_f=2.60$.

Pri nastanku i isključenju zemljospoja (izvedena su dva zemljospoja u konfiguraciji), a zatim IAPU, nije bilo visokih prenapona. Na fazi na kojoj je izveden zemljospoj, neposredno pre IAPU postojala je samo naizmenična komponenta napona, indukovana od ostale dve zdrave faze, čija je temena vrednost 10% temene vrednosti napona zdravih faza.

Koristeći podatke o izmerenim vrednostima faznih prenapona na kraju neopterećenih nadzemnih vodova, izračunati su iz izraza (11.2.2.1.1.1.) rizici preskoka za usvojene krive efekta fazne izolacije za sklopne prenapone, čiji su parametri u_{50} i σ dati u tabeli 11.2.1.1., a dobijeni na osnovu nazivnih kratkotrajnih podnosivih napona industrijske frekvencije. Pretpostavljeno je da prenaponi izmereni na kraju voda deluju na celokupnu izolaciju voda. Na osnovu utvrđenih rizika preskoka izračunati su iz izraza (11.2.2.1.1.3.) prosečni intervali vremena između dva uzastopna preskoka. Konstatovano je da su rizici preskoka pri uključenju voda veoma niski za izolaciju nazivnih kratkotrajnih podnosivih napona industrijske frekvencije 460 kV_{eff} i 395 kV_{eff}; prosečni intervali vremena između dva uzastopna preskoka su veći od životnog veka voda. Dakle, izolacija 460 kV_{eff} i 395 kV_{eff} pruža vrlo visoku pouzdanost rada vodova 220 kV. Za izolaciju nazivnih kratkotrajnih podnosivih napona industrijske frekvencije 360 kV_{eff} rizici su takođe niski; prosečni interval vremena između dva uzastopna preskoka je veći od 5 godina te izolacija voda 360 kV_{eff} pruža potrebnu pouzdanost rada vodova 220 kV.

Rizici preskoka su znatni za izolaciju nazivnih kratkotrajnih podnosivih napona industrijske frekvencije 325 kV_{eff} i 275 kV_{eff}. Za ove izolacije potrebno je razmotriti napone duž voda i sa tako dobijenim realnim vrednostima izračunati rizike preskoka. Pretpostavka da prenaponi izmereni na kraju voda deluju na celokupnu njegovu izolaciju može da dovede do nedovoljno tačnih zaključaka o pouzdanosti rada vodova 220 kV sa izolacijom 325 kV_{eff} i 275 kV_{eff}.

Rizici preskoka pri isključenju neopterećenih nadzemnih vodova novijim tipovima malouljnih prekidača su zanemarivi za sve razmatrane izolacije voda, dok su pri isključenju starijim tipovima malouljnih prekidača znatni, čak i za izolaciju 395 kV_{eff}. U procesu revitalizacije predviđa se zamena starijih konstrukcija malouljnih prekidača novijima, te prenaponi pri isključenju postaju neuticajni.

11.2.2.1.3. Parametri pouzdanosti izolacije nadzemnih vodova 110 kV za eksperimentima utvrđene sklopne prenapone

Eksperimentalna istraživanja prenapona na nadzemnim vodovima 110 kV pri sklopnim operacijama prekidača su izvršena na 3 neopterećena voda pri njihovom uključanju i isključenju i na jednom vodu pri 1APU [54].

U svim razmatranim konfiguracijama izvršeno je od 10 do 15 ciklusa operacija uključanje-isključanje, osim u konfiguraciji u kojoj je izvedeno 1APU. Prelazni fazni naponi su snimani na početku voda, te se samo na osnovu njih nisu mogli utvrditi rizici preskoka. Maksimalni fazni prenapon izmeren na početku istraživanih vodova je $k_f=1.45$. U toku uključanja nije dolazilo do pojave prethodnih paljenja električnog luka između kontakata prekidača. Isključenja sa savremenijim konstrukcijama prekidača nisu dovela do pojave značajnih prenapona, dok su isključenja sa starijim tipovima maloujnih prekidača stvarala znatne prenapone na vodu. Dolazilo je do pojave ponovnih paljenja električnog luka u prekidaču. Maksimalni izmereni fazni prenapon je $k_f=2.50$.

Pri nastanku i isključenju zemljospoja (izvedena su dva zemljospoja u konfiguraciji), a zatim pri 1APU, nije bilo visokih prenapona. Na fazi na kojoj je izveden zemljospoj, neposredno pre 1APU, postojala je samo naizmenična komponenta napona indukovana od ostale dve zdrave faze: njena temena vrednost je 15% temene vrednosti napona zdravih faza.

11.2.2.2. Parametri pouzdanosti izolacije nadzemnih vodova 400 kV, 220 kV i 110 kV za proračunima utvrđene sklopne prenapone

Proračuni prenapona pri operacijama prekidača 400 kV, 220 kV i 110 kV su izvršeni na većem broju nadzemnih vodova različitih dužina u elektroenergetskom sistemu. Na izolaciji vodova posmatrani su sledeći uticajni skupovi prenapona:

- skupovi prenapona pri uključenju neopterećenih nadzemnih vodova,
- skupovi prenapona pri 1APU nadzemnih vodova,
- skupovi prenapona pri 3APU nadzemnih vodova.

Nisu razmatrani skupovi prenapona pri isključenju nadzemnih vodova, jer oni zavise prvenstveno od karakteristika prekidača. Izborom kvalitetnih prekidača prenaponi pri isključenjima se svode na neuticajne.

1APU i 3APU nadzemnih vodova su zaštitne mere koje doprinose pouzdanijem radu elektroenergetskog sistema i sigurnijem napajanju potrošača električnom energijom. Obe ove zaštitne mere u velikom broju slučajeva mogu da efikasno eliminišu prolazne kvarove na nadzemnim vodovima i time znatno smanje broj ispada vodova iz pogona. 1APU se primenjuje za nadzemne vodove 400 kV, 220 kV i 110 kV u elektroenergetskom sistemu SR Jugoslavije, a 3APU se ne primenjuje samo na naponskom nivou 400 kV, jer se smatra da se korišćenjem ove zaštitne mere mogu pojaviti visoki prenaponi u sistemu 400 kV opasni po njegovu izolaciju. Pretpostavlja se da na nadzemnim vodovima po njihovom isključenju ostaju znatni preostali naponi i da oni mogu da budu uzrok pojave visokih prenapona kada se vodovi uključe posle pauze od oko 1s. Činjenica je da na oba kraja većeg broja nadzemnih vodova postoje kapacitivni naponski transformatori i da u idealnom slučaju, ako se zanemare odvodnosti, na vodovima posle isključenja mogu ostati znatni preostali naponi. Kada su umesto kapacitivnih prisutni induktivni naponski transformatori, rasterećenje vodova po njihovom isključenju se dešava za nekoliko desetina ms.

Proračuni prenapona pri 1APU nadzemnih vodova, posle isključenja zemljospoja na jednoj od faza, su izvođeni za sledeće početne uslove:

- a) preostali napon na isključenju fazi jednak je temenoj vrednosti faznog napona na početku voda pre isključenja zemljospoja na sredini voda (približno iznosi oko 20% temene vrednosti faznog napona pre zemljospoja),
- b) nema preostalog napona na isključenju fazi, osim indukovano napona uticajem ostale dve faze.

Proračuni prenapona pri 3APU nadzemnih vodova, posle isključenja dvofaznog zemljospoja, su izvođeni za sledeće početne uslove:

- a) preostali napon na fazi na kojoj nije bio zemljospoj je jednak temenoj vrednosti faznog napona pre pojave zemljospoja, a na druge dve faze temenoj vrednosti faznih napona na početku voda pri pojavi dvofaznog zemljospoja na sredini voda (oko 20% temene vrednosti faznog napona pre pojave zemljospoja),
- b) preostali napon na fazi na kojoj nije bio zemljospoj je 30% temene vrednosti napona pre pojave zemljospoja, a na druge dve faze nema preostalog napona.

1APU i 3APU pod a) odgovaraju stanju preostalih napona na fazama voda sa suvom izolacijom, a pod b) sa vlažnom izolacijom.

Opređenje za preostali napon na fazama pri 1APU i 3APU posle isključenja zemljospoja na sredini voda je proisteklo posle istraživanja na jednom od karakterističnih vodova 400 kV. Konstatovano je da je srednja vrednost rizika ispada, pri 1APU i 3APU posle isključivanja zemljospoja posmatranog duž voda, približna vrednosti rizika dobijenog pri 1APU i 3APU posle isključenja zemljospoja na sredini voda.

Statistički podaci o događajima u elektroenergetskom sistemu SR Jugoslavije pokazuju da se mnogo veći broj zemljospojeva i kratkih spojeva dešava u uslovima vlažne atmosfere: kiša, sneg, rosa, led, itd. U periodu do 1s, koliko prođe od trenutka isključenja do trenutka uključenja nadzemnog voda pri dejstvu zaštite IAPU, preostali naponi na isključenoj fazi sa vlažnom izolacijom praktično padaju na nulu zbog velike odvodnosti. Rezultati eksperimentalnih istraživanja prenapona u mreži 400 kV pri delovanju IAPU (izvedeno je 6 IAPU i snimljeni su prenaponi na sve tri faze na istraživanim nadzemnim vodovima 400 kV) su ukazali na niske vrednosti preostalih napona, iako su istraživanja izvršena na vodovima sa suvom izolacijom. To ukazuje da je malo verovatno da se na nadzemnim vodovima mogu zadržati preostali naponi znatne visine po njihovom isključenju i kada je izolacija voda u suvom stanju.

11.2.2.2.1. Parametri pouzdanosti izolacije nadzemnih vodova 400 kV za proračunima utvrđene sklopne prenapone

Istraživanja prenapona pri uključenju neopterećenih vodova, IAPU i 3APU su izvršena na devet 400 kV nadzemnih vodova u SR Jugoslaviji i to: "Drmno-Đerdap 1" (154 km), "Drmno-Pančevo 2" (49 km), "Drmno-Beograd 8" (87 km), "Beograd 8-Đerdap 1" (203 km), "Beograd 8-Obrenovac" (49 km), "Bor 2-Niš 2" (99 km), "Bor 2-Đerdap 1" (83 km) "Niš 2-Kragujevac" (136 km) i "Niš 2-Kosovo B" (124 km). IAPU i 3APU su izvođena za sve vodove za stanja preostalih napona na njihovim fazama data za slučajeve suve i vlažne izolacije. Pretpostavljeno je da su mreže 400 kV, 220 kV i 110 kV u normalnom radu i ekvivalentiranja u susednim TS, pored onih u kojima su izvođena uključenja prekidača vodova, su izvršena u skladu sa tim.

Na osnovu utvrđenih prenapona (vod je podeljen u više deonica) na kraju posmatranih deonica voda, za svaku operaciju uključenja neopterećenog voda, IAPU i 3APU su izračunati rizici preskoka na izolacijama voda. Pretpostavljeno je da su sve fazne i međufazne izolacije na deonici voda pod istim prenaponima jednakim prenaponima utvrđenim na kraju deonice. Rizik preskoka pri uključenju neopterećenog voda, odnosno IAPU, odnosno 3APU je utvrđen iz sledećeg izraza:

$$R = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left\{ 1 - \prod_{j=1}^d \left[(1 - P_{0,j,i})(1 - P_{4,j,i})(1 - P_{8,j,i}) \right]^{n_j} \left[(1 - P_{0-4,j,i})(1 - P_{4-8,j,i})(1 - P_{8-0,j,i}) \right]^{r_j} \right\} \quad (11.2.2.2.1.1.)$$

Ovde su:

$P_{0,j,i}$, $P_{4,j,i}$, $P_{8,j,i}$ - verovatnoće preskoka izolacionih konstrukcija faza 0,4 i 8 j-te deonice voda pri delovanju prenapona na njima u toku i-te operacije uključenja,

$P_{0-4,j,i}$, $P_{4-8,j,i}$, $P_{8-0,j,i}$ - verovatnoće preskoka izolacija između faza 0-4, 4-8 i 8-0 j-te deonice voda pri delovanju prenapona na njima u toku i-te operacije uključenja,

N - broj uključenja neopterećenog voda, odnosno broj IAPU, odnosno broj 3APU ($N=200$),

d - broj deonica voda na čijim krajevima su računati prenaponi,

n_j - broj izolacionih konstrukcija po fazi deonice j ,

r_j - broj izolacija između dve faze na deonici j (kao izolacije između faza usvojeni su vazдушna rastojanja na rasponu između dva susedna stuba voda).

Verovatnoće preskoka su određene iz izraza (11.2.2.1.1.4.), gde u_j predstavlja maksimalnu vrednost prenapona na posmatranoj izolaciji pri razmatranoj operaciji uključenja.

Rizici preskoka na vodovima su izračunati za suve i vlažne izolacije koristeći parametre krivih efekta date u tabeli 11.2.1.1..

U tabeli 11.2.2.2.1.1. su date maksimalne vrednosti prenapona izračunate na kraju istraživanih nadzemnih vodova 400 kV sa suvom i vlažnom izolacijom pri njihovom uključenju u neopterećenom stanju, IAPU i 3APU, a u tabeli 11.2.2.2.1.2. ustanovljeni rizici preskoka izolacije.

Izmene u režimu rada mreže 400 kV, dovode do promena prenapona pri uključenju neopterećenih vodova, 1APU i 3APU, a time i rizika preskoka. Promene rizika preskoka mogu da budu znatne, naročito ako su velike promene u konfiguracijama mreže, kao npr. u slučaju formiranja mreže posle njenog raspada. Kada su rizici mali, oko 10^{-3} i manji, njihove promene od nekoliko puta nisu od značaja. Međutim, kada se radi o rizicima većim od 10^{-2} , a posebno kada su veći od 10^{-1} , njihove male promene mogu da budu od značaja za ocenu pouzdanosti rada vodova pri uključenjima u neopterećenom stanju, 1APU i 3APU.

Za utvrđivanje, pored rizika preskoka, ostalih parametra pouzdanosti rada vodova: očekivanog godišnjeg broja preskoka, ispada i oštećenja, i prosečnog intervala vremena između dva uzastopna preskoka, ispada i oštećenja, potrebno je znati podatke o godišnjem broju uključenja neopterećenih nadzemnih vodova 400 kV, kao i o broju njihovih 1APU i 3APU. Na osnovu statističkih podataka poslednjih deset godina iz "Godišnjeg izveštaja o delatnosti prenosa električne energije" koje izdaje "Elektroistok" prosečni broj 1APU (N_{1APU}) je oko 5 na 100 km vodova 400 kV godišnje; znatan porast 1APU je bio u 1995.godini (oko 9 1APU na 100 km godišnje). Pošto se zaštita 3APU ne koristi za vodove 400 kV, broj 3APU (N_{3APU}) je procenjen na osnovu podataka o ispadima vodova 400 kV isključujući ispade usled neuspešnih 1APU i iznosi manje od 0.5 na 100 km vodova godišnje. Prosečan broj "ručnih" uključenja (N_U) neopterećenih vodova je oko 6 godišnje. U proračunu su usvojeni sledeći podaci: $N_U = 10$ uključenja godišnje, $N_{1APU} = 7$ 1APU na 100 km godišnje i $N_{3APU} = 0.5$ 3APU na 100 km godišnje. Kada je izolacija vodova u suvom stanju, broj 1APU i 3APU je manji nego kada je izolacija vlažna. Pretpostavljeno je da je broj operacija prekidača vodova sa izolacijom u vlažnom 4 puta veći nego kada je izolacija u suvom stanju. Očekivani godišnji broj preskoka (N_p) i ispada (N_i) i prosečni interval vremena (T_i) između dva uzastopna ispada pri uključenju neopterećenog voda 1APU i 3APU su određeni iz izraza:

$$N_p = N_U (0.2R_{U,s} + 0.8R_{U,v}) + l [N_{1APU} (0.2R_{1APU,s} + 0.8R_{1APU,v}) + N_{3APU} (0.2R_{3APU,s} + 0.8R_{3APU,v})] \quad (11.2.2.2.1.2.)$$

$$N_i = l [N_{1APU} (0.2R_{1APU,s} + 0.8R_{1APU,v}) + N_{3APU} (0.2R_{3APU,s} + 0.8R_{3APU,v})] \quad (11.2.2.2.1.3.)$$

$$T_p = \frac{1}{N_p} \quad (11.2.2.2.1.4.)$$

$$T_i = \frac{1}{N_i} \quad (11.2.2.2.1.5.)$$

Ovde su:

N_U, N_{1APU}, N_{3APU} - brojevi uključenja neopterećenog voda godišnje i brojevi 1APU i 3APU na 100 km voda godišnje,

$R_{U,s}, R_{1APU,s}, R_{3APU,s}$ -rizici preskoka na vodu sa suvom izolacijom pri uključenju neopterećenog voda, 1APU i 3APU,

$R_{U,v}, R_{1APU,v}, R_{3APU,v}$ - rizici preskoka na vodu sa vlažnom izolacijom pri uključenju neopterećenog voda, 1APU i 3APU,

l - dužina voda izražena u jediničnim vrednostima od 100 km.

N_{1APU} i N_{3APU} obuhvataju i ona 1APU i 3APU koja nastaju kao posledica preskoka usled sklopnih prenapona pri uključenju neopterećenog voda. Rizici preskoka pri 1APU i 3APU predstavljaju rizike ispada, jer svaki preskok pri ovim operacijama predstavlja definitivni ispad voda. Ako se pretpostavi da svaki deseti ispad dovodi do oštećenja izolacije voda očekivani godišnji broj oštećenja (N_{ot}) i prosečni interval vremena (T_{ot}) između dva uzastopna oštećenja na vodu se utvrđuju iz sledećih izraza:

$$N_{ot} = 0.1 N_i \quad (11.2.2.2.1.6.)$$

$$T_{ot} = 10 T_i \quad (11.2.2.2.1.7.)$$

U tabeli 11.2.2.2.1.3. su dati očekivani godišnji brojevi preskoka, ispada i oštećenja, kao i prosečni intervali vremena između dva uzastopna preskoka, ispada i oštećenja na vodovima 400 kV, čiji su uzroci sklopni prenaponi.

Iz tabele 11.2.2.2.1.3. se vidi da je pouzdanost rada razmatranih vodova sa izolacijom U_f/U_{mf} : 1050 kV/1575 kV i 950 kV/1425 kV veoma visoki pri pojavi sklopnih prenapona i da je zadovoljavajuća za izolaciju vodova 850 kV/1360 kV (isključen je iz razmatranja vod "Beograd 8-Đerdap 1" jer isti više nije u funkciji kao celina; podeljen je na dva voda "Drmno - Đerdap 1" i "Drmno - Beograd 8").

Vrednosti pokazatelja pouzdanosti izolacije nadzemnih vodova 400 kV, date u tabeli 11.2.2.2.1.3., su utvrđene za izolacije čiji preskočni naponi ostaju isti u celom životnom veku. Uzimajući u obzir koeficijent sigurnosti, koji uvažava starenje i neke druge nepoznate faktore koji dovode do spuštavanja podnosivih napona izolacije, i koeficijent visinske korekcije za prosečnu nadmorsku visinu vodova od 400 m (smanjenje vrednosti parametara krivih efekata datih u tabeli 11.2.1.1., spoljašnje vlažne i suve fazne izolacije za 10% i međufazne izolacije za 5%) ustanovljeni su rizici preskoka, očekivani godišnji brojevi preskoka, proboja i oštećenja i prosečni intervali vremena između dva uzastopna preskoka, proboja i oštećenja i dati u tabelama 11.2.2.2.1.4. i 11.2.2.2.1.5.

Iz tabele 11.2.2.2.1.5. se vidi da je pouzdanost rada vodova sa izolacijom U_f/U_{mf} =1050 kV/1575 kV veoma visoka pri pojavi sklopnih prenapona i da je zadovoljavajuća za izolaciju vodova U_f/U_{mf} =950 kV/1425 kV.

Tabela 11.2.2.1.1. Maksimalni fazni i međufazni prenaponi na kraju nadzemnih vodova 400 kV sa suvom i vlažnom izolacijom pri njihovom uključenju u neopterećenom stanju, 1APU i 3APU

Redni broj	Nadzemni vod 400 kV	Maksimalni fazni ($U_{f,m}$) i međufazni ($U_{mf,m}$) prenaponi na vodovima 400 kV (U - uključenje neopterećenog voda sa suvom ili vlažnom izolacijom; $U_{1APU,s}$, $U_{3APU,s}$ - 1APU i 3APU voda sa suvom izolacijom; $U_{1APU,v}$, $U_{3APU,v}$ - 1APU i 3APU voda sa vlažnom izolacijom)									
		U		$U_{1APU,v}$		$U_{1APU,s}$		$U_{3APU,v}$		$U_{3APU,s}$	
		$U_{f,m}$ (kV)	$U_{mf,m}$ (kV)	$U_{f,m}$ (kV)	$U_{mf,m}$ (kV)	$U_{f,m}$ (kV)	$U_{mf,m}$ (kV)	$U_{f,m}$ (kV)	$U_{mf,m}$ (kV)	$U_{f,m}$ (kV)	$U_{mf,m}$ (kV)
1.	Drmno - Đerdap 1 (154 km)	680	990	570	880	610	900	710	1000	850	1150
2.	Drmno - Pančevo 2 (50 km)	570	890	500	820	570	890	620	940	710	1010
3.	Drmno - Beograd 8 (86 km)	620	930	530	840	590	910	670	990	780	1100
4.	Beograd 8 - Đerdap 1 (203 km)	730	1090	630	940	730	1020	810	1130	990	1310
5.	Beograd 8 - Obrenovac (49 km)	520	820	490	810	530	870	610	910	670	960
6.	Bor 2 - Niš 2 (99 km)	670	970	550	850	600	890	700	960	820	1100
7.	Bor 2 - Đerdap 1 (83 km)	610	920	520	830	570	900	660	980	760	1000
8.	Niš 2 - Kosovo B (124 km)	650	960	570	860	590	900	680	1000	810	1110
9.	Niš 2 - Kragujevac (137 km)	640	940	540	850	590	890	670	990	810	1120

Tabela 11.2.2.2.1.2. Rizici preskoka na nadzemnim vodovima 400 kV sa suvom i vlažnom izolacijom pri njihovom uključenju u neopterećenom stanju, 1APU i 3APU

Redni broj	Nadzemni vod 400 kV	Podnosivi sklopni udarni fazni (U_f) i međufazni (U_{mf}) naponi izolacije voda		Rizici preskoka na nadzemnim vodovima 400 kV ($R_{U,V}, R_{U,S}$ - rizici preskoka na vodu sa suvom i vlažnom izolacijom pri njegovom uključenju u neopterećenom stanju; $R_{1APU,V}, R_{3APU,V}$ - rizici preskoka na vodu sa vlažnom izolacijom pri 1APU i 3APU; $R_{1APU,S}, R_{3APU,S}$ - rizici preskoka na vodu sa suvom izolacijom pri 1APU i 3APU)					
		U_f kV _{tv}	U_{mf} kV _{tv}	$R_{U,V}$	$R_{U,S}$	$R_{1APU,V}$	$R_{1APU,S}$	$R_{3APU,V}$	$R_{3APU,S}$
1.	Drmno - Đerdap 1	850	1360	$3.1 \cdot 10^{-2}$	$1.7 \cdot 10^{-3}$	$2.5 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-4}$	$9.4 \cdot 10^{-2}$	$2.4 \cdot 10^{-1}$
		950	1425	$1.6 \cdot 10^{-3}$	$<10^{-4}$	$<10^{-4}$	$<10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-2}$	$4.9 \cdot 10^{-2}$
		1050	1575	$<10^{-4}$	$<10^{-4}$	$<10^{-4}$	$<10^{-4}$	$2.8 \cdot 10^{-4}$	$2.9 \cdot 10^{-3}$
2.	Drmno - Pančevo 2	850	1360	$1.6 \cdot 10^{-4}$	$<10^{-4}$	$<10^{-4}$	$<10^{-4}$	$1.2 \cdot 10^{-3}$	$2.1 \cdot 10^{-2}$
		950	1425	$<10^{-4}$	$<10^{-4}$	$<10^{-4}$	$<10^{-4}$	$2.3 \cdot 10^{-4}$	$1.2 \cdot 10^{-3}$
		1050	1575	$<10^{-4}$	$<10^{-4}$	$<10^{-4}$	$<10^{-4}$	$<10^{-4}$	$<10^{-4}$
3.	Drmno - Beograd 8	850	1360	$3.9 \cdot 10^{-3}$	$1.1 \cdot 10^{-4}$	$1.6 \cdot 10^{-4}$	$<10^{-4}$	$2.2 \cdot 10^{-2}$	$7.4 \cdot 10^{-2}$
		950	1425	$1.1 \cdot 10^{-4}$	$<10^{-4}$	$<10^{-4}$	$<10^{-4}$	$1.1 \cdot 10^{-3}$	$4.2 \cdot 10^{-3}$
		1050	1575	$<10^{-4}$	$<10^{-4}$	$<10^{-4}$	$<10^{-4}$	$<10^{-4}$	$1.6 \cdot 10^{-4}$
4.	Beograd 8 - Đerdap 1	850	1360	$8.8 \cdot 10^{-2}$	$7.7 \cdot 10^{-3}$	$4 \cdot 10^{-2}$	$3.4 \cdot 10^{-2}$	$3.1 \cdot 10^{-1}$	$3.6 \cdot 10^{-1}$
		950	1425	$3.6 \cdot 10^{-3}$	$5.2 \cdot 10^{-4}$	$1.8 \cdot 10^{-3}$	$1.4 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-1}$	$2.3 \cdot 10^{-1}$
		1050	1575	$1.1 \cdot 10^{-4}$	$<10^{-4}$	$1.1 \cdot 10^{-4}$	$<10^{-4}$	$1.3 \cdot 10^{-2}$	$9 \cdot 10^{-2}$
5.	Beograd 8 - Obrenovac	850	1360	$<10^{-4}$	$<10^{-4}$	$<10^{-4}$	$<10^{-4}$	10^{-4}	$<10^{-4}$
		950	1425	$<10^{-4}$	$<10^{-4}$	$<10^{-4}$	$<10^{-4}$	$<10^{-4}$	$<10^{-4}$
		1050	1575	$<10^{-4}$	$<10^{-4}$	$<10^{-4}$	$<10^{-4}$	$<10^{-4}$	$<10^{-4}$
6.	Bor 2 - Niš 2	850	1360	$2.2 \cdot 10^{-2}$	$1.1 \cdot 10^{-3}$	$5.7 \cdot 10^{-4}$	$<10^{-4}$	$4.6 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{-1}$
		950	1425	$1.2 \cdot 10^{-3}$	$<10^{-4}$	$<10^{-4}$	$<10^{-4}$	$3.9 \cdot 10^{-3}$	$1.1 \cdot 10^{-2}$
		1050	1575	$<10^{-4}$	$<10^{-4}$	$<10^{-4}$	$<10^{-4}$	$<10^{-4}$	$4.3 \cdot 10^{-4}$
7.	Bor 2 - Đerdap 1	850	1360	$3.6 \cdot 10^{-3}$	$<10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-4}$	$<10^{-4}$	$1.3 \cdot 10^{-2}$	$5 \cdot 10^{-2}$
		950	1425	$2.1 \cdot 10^{-4}$	$<10^{-4}$	$<10^{-4}$	$<10^{-4}$	$1.1 \cdot 10^{-3}$	$4 \cdot 10^{-3}$
		1050	1575	$<10^{-4}$	$<10^{-4}$	$<10^{-4}$	$<10^{-4}$	$<10^{-4}$	$<10^{-4}$
8.	Niš 2 - Kosovo B	850	1360	$9.7 \cdot 10^{-3}$	$1.1 \cdot 10^{-3}$	$2.4 \cdot 10^{-4}$	$<10^{-4}$	$2.1 \cdot 10^{-2}$	$9.5 \cdot 10^{-2}$
		950	1425	$1.1 \cdot 10^{-3}$	$<10^{-4}$	$<10^{-4}$	$<10^{-4}$	$1.7 \cdot 10^{-3}$	$2.4 \cdot 10^{-3}$
		1050	1575	$<10^{-4}$	$<10^{-4}$	$<10^{-4}$	$<10^{-4}$	$<10^{-4}$	$6.2 \cdot 10^{-4}$
9.	Niš 2 - Kragujevac	850	1360	$5.7 \cdot 10^{-3}$	$4.5 \cdot 10^{-4}$	$1.8 \cdot 10^{-3}$	$<10^{-4}$	$2.1 \cdot 10^{-2}$	$8 \cdot 10^{-2}$
		950	1425	$4.5 \cdot 10^{-4}$	$<10^{-4}$	$<10^{-4}$	$<10^{-4}$	$1.8 \cdot 10^{-3}$	$7.9 \cdot 10^{-3}$
		1050	1575	$<10^{-4}$	$<10^{-4}$	$<10^{-4}$	$<10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-4}$	$2.5 \cdot 10^{-4}$

Tabela 11.2.2.2.1.3. Očekivani godišnji brojevi preskoka (N_p), ispada (N_i) i oštećenja (N_{ot}) i prosečni intervali vremena između dva uzastopna preskoka (T_p), ispada (T_i) i oštećenja (T_{ot}) usled sklopnih prenapona na nadzemnim vodovima 400 kV sa izolacijom različitih sprege standardizovanih sklopnih udarnih faznih i međufaznih napona

Redni broj	Nadzemni vod 400 kV	Podnosivi sklopni udarni fazni (U_f) i međufazni (U_{mf}) naponi izolacije voda		Očekivani godišnji brojevi preskoka, ispada i oštećenja i prosečni intervali vremena između dva uzastopna preskoka, ispada i oštećenja					
		U_f kV _{tv}	U_{mf} kV _{tv}	N_p	T_p (god.)	N_i	T_i (god.)	N_{ot}	T_{ot} (god.)
1.	Drmno - Đerdap 1	850	1360	0.368	2.7	0.036	8.5	0.0036	271
		950	1425	<0.028	>36	<0.015	>66	<0.0015	>660
		1050	1575	<0.003	>330	<0.0017	>580	0.00017	>5800
2.	Drmno - Pančevo 2	850	1360	<0.0031	>320	<0.0016	>625	0.00016	>6250
		950	1425	<0.0015	>660	<0.0005	>2000	0.00005	>20000
		1050	1575	<0.0014	>700	<0.0004	>2500	0.00004	>25000
3.	Drmno - Beograd 8	850	1360	0.047	21	0.015	66	0.0015	660
		950	1425	<0.0042	>230	<0.0031	>320	<0.00031	>3200
		1050	1575	<0.0017	>580	<0.0007	>1400	<0.00007	>14000
4.	Beograd 8 - Đerdap 1	850	1360	1.6	0.625	0.88	1.1	0.088	11
		950	1425	0.21	4.8	0.18	5.6	0.018	56
		1050	1575	<0.031	>32	<0.03	>33	<0.003	>330
5.	Beograd 8 - Obrenovac	850	1360	<0.0014	>700	<0.0004	>2500	<0.00004	>25000
		950	1425	<0.0014	>700	<0.0004	>2500	<0.00004	>25000
		1050	1575	<0.0014	>700	<0.0004	>2500	<0.00004	>25000
6.	Bor 2 - Niš 2	850	1360	<0.21	>4.8	<0.03	>33	<0.003	>330
		950	1425	<0.013	>75	<0.0033	>300	<0.00033	>3000
		1050	1575	<0.0018	>550	<0.0008	>1250	<0.00008	>12500
7.	Bor 2 - Đerdap 1	850	1360	<0.039	>25	<0.0095	>100	<0.00095	>1000
		950	1425	<0.0032	>310	<0.0013	>760	<0.00013	>7600
		1050	1575	<0.0016	>620	<0.0006	>1660	<0.00006	>16600
8.	Niš 2 - Kosovo B	850	1360	<0.1	>10	<0.024	>40	<0.0024	>400
		950	1425	<0.011	>90	<0.002	>500	<0.0002	>5000
		1050	1575	<0.002	>500	<0.001	>1000	<0.0001	>10000
9.	Niš 2 - Kragujevac	850	1360	<0.085	>11	<0.038	>26	<0.0038	>260
		950	1425	<0.068	>14	<0.003	>330	<0.0003	>3300
		1050	1575	<0.002	>500	<0.001	>100	<0.0001	>10000

Tabela 11.2.2.2.1.4. Rizici preskoka na nadzemnim vodovima 400 kV sa suvom i vlažnom izolacijom pri njihovom uključenju u neopterećenom stanju, 1APU i 3APU (uvaženo starenje i visinska korekcija za prosečnu nadmorsku visinu vodova od 400 m)

Redni broj	Nadzemni vod 400 kV	Podnosivi sklopni udarni fazni (U_f) i međufazni (U_{mf}) naponi izolacije voda		Rizici preskoka na nadzemnim vodovima 400 kV (R_{U_v}, R_{U_s} - rizici preskoka na vodu sa suvom i vlažnom izolacijom pri njegovom uključenju u neopterećenom stanju; R_{1APU_v}, R_{3APU_v} - rizici preskoka na vodu sa vlažnom izolacijom pri 1APU i 3APU; R_{1APU_s}, R_{3APU_s} - rizici preskoka na vodu sa suvom izolacijom pri 1APU i 3APU)					
		U_f kV _{tv}	U_{mf} kV _{tv}	R_{U_v}	R_{U_s}	R_{1APU_v}	R_{1APU_s}	R_{3APU_v}	R_{3APU_s}
1.	Drmno - Đerdap 1	850	1360	$3.1 \cdot 10^{-1}$	$4.4 \cdot 10^{-2}$	$9.6 \cdot 10^{-2}$	$1.6 \cdot 10^{-2}$	$4.3 \cdot 10^{-1}$	$3.5 \cdot 10^{-1}$
		950	1425	$3.4 \cdot 10^{-2}$	$1.8 \cdot 10^{-3}$	$2.8 \cdot 10^{-3}$	$3.4 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-1}$	$2.4 \cdot 10^{-1}$
		1050	1575	$1.8 \cdot 10^{-3}$	$< 10^{-4}$	$< 10^{-4}$	$< 10^{-4}$	$1.1 \cdot 10^{-2}$	$6.2 \cdot 10^{-2}$
2.	Drmno - Pančevo 2	850	1360	$1.3 \cdot 10^{-2}$	$1.8 \cdot 10^{-3}$	$2.2 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$4.5 \cdot 10^{-2}$	$1.4 \cdot 10^{-1}$
		950	1425	$5.5 \cdot 10^{-4}$	$< 10^{-4}$	$< 10^{-4}$	$< 10^{-4}$	$2.8 \cdot 10^{-3}$	$2.7 \cdot 10^{-2}$
		1050	1575	$< 10^{-4}$	$< 10^{-4}$	$< 10^{-4}$	$< 10^{-4}$	$1.3 \cdot 10^{-4}$	$2.4 \cdot 10^{-3}$
3.	Drmno - Beograd 8	850	1360	$8.3 \cdot 10^{-2}$	$6 \cdot 10^{-3}$	$9.9 \cdot 10^{-3}$	$3.6 \cdot 10^{-3}$	$1.8 \cdot 10^{-1}$	$2.7 \cdot 10^{-1}$
		950	1425	$4 \cdot 10^{-3}$	$1.4 \cdot 10^{-4}$	$2.2 \cdot 10^{-4}$	$< 10^{-4}$	$2.3 \cdot 10^{-2}$	$7.5 \cdot 10^{-2}$
		1050	1575	$1.2 \cdot 10^{-4}$	$< 10^{-4}$	$< 10^{-4}$	$< 10^{-4}$	$9.8 \cdot 10^{-4}$	$6.1 \cdot 10^{-3}$
4.	Beograd 8 - Đerdap 1	850	1360	$3.9 \cdot 10^{-1}$	$9.6 \cdot 10^{-2}$	$2.4 \cdot 10^{-1}$	$9.6 \cdot 10^{-2}$	$6.8 \cdot 10^{-1}$	$5.5 \cdot 10^{-1}$
		950	1425	$8.3 \cdot 10^{-2}$	$2.9 \cdot 10^{-3}$	$4.5 \cdot 10^{-2}$	$3.1 \cdot 10^{-2}$	$3.2 \cdot 10^{-1}$	$3.6 \cdot 10^{-1}$
		1050	1575	$3.5 \cdot 10^{-3}$	$< 10^{-4}$	$1.6 \cdot 10^{-3}$	$1.7 \cdot 10^{-3}$	$9.6 \cdot 10^{-2}$	$2.4 \cdot 10^{-1}$
5.	Beograd 8 - Obrenovac	850	1360	$< 10^{-4}$	$< 10^{-4}$	$< 10^{-4}$	$< 10^{-4}$	$< 10^{-4}$	$2.5 \cdot 10^{-4}$
		950	1425	$< 10^{-4}$	$< 10^{-4}$	$< 10^{-4}$	$< 10^{-4}$	$< 10^{-4}$	$< 10^{-4}$
		1050	1575	$< 10^{-4}$	$< 10^{-4}$	$< 10^{-4}$	$< 10^{-4}$	$< 10^{-4}$	$< 10^{-4}$
6.	Bor 2 - Niš 2	850	1360	$1.9 \cdot 10^{-1}$	$3.2 \cdot 10^{-2}$	$2.3 \cdot 10^{-2}$	$4 \cdot 10^{-3}$	$2.2 \cdot 10^{-1}$	$2.2 \cdot 10^{-1}$
		950	1425	$2.3 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$5.5 \cdot 10^{-4}$	$< 10^{-4}$	$4.8 \cdot 10^{-2}$	$9.5 \cdot 10^{-2}$
		1050	1575	$9.3 \cdot 10^{-4}$	$< 10^{-4}$	$< 10^{-4}$	$< 10^{-4}$	$3.6 \cdot 10^{-3}$	$1.3 \cdot 10^{-2}$
7.	Bor 2 - Đerdap 1	850	1360	$1.7 \cdot 10^{-2}$	$7.1 \cdot 10^{-4}$	$8.1 \cdot 10^{-3}$	$8.4 \cdot 10^{-4}$	$8.4 \cdot 10^{-2}$	$1.5 \cdot 10^{-1}$
		950	1425	$3.9 \cdot 10^{-4}$	$< 10^{-4}$	$< 10^{-4}$	$< 10^{-4}$	$1.2 \cdot 10^{-2}$	$6 \cdot 10^{-2}$
		1050	1575	$< 10^{-4}$	$< 10^{-4}$	$< 10^{-4}$	$< 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$1.1 \cdot 10^{-2}$
8.	Niš 2 - Kosovo B	850	1360	$1.2 \cdot 10^{-1}$	$9.9 \cdot 10^{-3}$	$9.4 \cdot 10^{-3}$	$1.6 \cdot 10^{-3}$	$1.7 \cdot 10^{-1}$	$2.1 \cdot 10^{-1}$
		950	1425	$6.7 \cdot 10^{-3}$	$2.4 \cdot 10^{-4}$	$3.9 \cdot 10^{-4}$	$< 10^{-4}$	$2.3 \cdot 10^{-2}$	$9.3 \cdot 10^{-2}$
		1050	1575	$2 \cdot 10^{-4}$	$< 10^{-4}$	$< 10^{-4}$	$< 10^{-4}$	$1.6 \cdot 10^{-3}$	$1.6 \cdot 10^{-2}$
9.	Niš 2 - Kragujevac	850	1360	$2.6 \cdot 10^{-2}$	$1.5 \cdot 10^{-3}$	$4 \cdot 10^{-2}$	$2 \cdot 10^{-3}$	$1.8 \cdot 10^{-1}$	$2.5 \cdot 10^{-1}$
		950	1425	$8.3 \cdot 10^{-4}$	$< 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-3}$	$< 10^{-4}$	$2.4 \cdot 10^{-2}$	$9.5 \cdot 10^{-2}$
		1050	1575	$< 10^{-4}$	$< 10^{-4}$	$< 10^{-4}$	$< 10^{-4}$	$1.7 \cdot 10^{-3}$	$1.7 \cdot 10^{-2}$

Tabela 11.2.2.2.1.5. Očekivani godišnji brojevi preskoka (N_p), ispada (N_i) i oštećenja (N_{ot}) i prosečni intervali vremena između dva uzastopna preskoka (T_p), ispada (T_i) i oštećenja (T_{ot}) usled sklopnih prenapona na nadzemnim vodovima 400 kV sa izolacijom različitih sprega standardizovanih sklopnih udarnih faznih i međufaznih napona (uvaženo starenje i visinska korekcija za prosečnu nadmorsku visinu vodova od 400 m)

Redni broj	Nadzemni vod 400 kV	Podnosivi sklopni udarni fazni (U_f) i međufazni (U_{mf}) naponi izolacije voda		Očekivani godišnji brojevi preskoka, ispada i oštećenja i prosečni intervali vremena između dva uzastopna preskoka, ispada i oštećenja					
		U_f kV _{IV}	U_{mf} kV _{IV}	N_p	T_p (god.)	N_i	T_i (god.)	N_{ot}	T_{ot} (god.)
1.	Drmno - Đerdap 1	850	1360	<3.4	>0.3	<0.9	>1.1	<0.09	>11
		950	1425	<0.32	>3	<0.04	>25	<0.004	>250
		1050	1575	<0.016	>60	<0.004	>250	<0.0004	>2500
2.	Drmno - Pančevo 2	850	1360	<0.02	>50	<0.008	>125	<0.008	>1250
		950	1425	<0.004	>250	<0.0005	>2000	0.00005	>20000
		1050	1575	<0.0014	>700	<0.0004	>2500	0.00004	>25000
3.	Drmno - Beograd 8	850	1360	<0.74	>1.4	<0.06	>17	<0.006	>160
		950	1425	<0.04	>25	<0.01	>100	<0.001	>1000
		1050	1575	<0.004	>250	<0.002	>500	<0.0002	>5000
4.	Beograd 8 - Đerdap 1	850	1360	<4	>0.25	<3.1	>0.32	<0.31	>3.2
		950	1425	<1.3	>0.77	<0.64	>1.6	<0.064	>16
		1050	1575	<0.06	>17	<0.05	>20	<0.005	>200
5.	Beograd 8 - Obrenovac	850	1360	<0.0014	>700	<0.0004	>2500	<0.00004	>25000
		950	1425	<0.0014	>700	<0.0004	>2500	<0.00004	>25000
		1050	1575	<0.0014	>700	<0.0004	>2500	<0.00004	>25000
6.	Bor 2 - Niš 2	850	1360	<1.7	>0.59	<0.15	>6.7	<0.015	>60
		950	1425	<0.2	>5	<0.025	>40	<0.0025	>400
		1050	1575	<0.01	>100	<0.0028	>300	<0.00028	>3000
7.	Bor 2 - Đerdap 1	850	1360	<0.19	>5.3	<0.05	>20	<0.005	>200
		950	1425	<0.02	>50	<0.008	>125	<0.0008	>1250
		1050	1575	<0.003	>300	<0.001	>100	<0.0001	>10000
8.	Niš 2 - Kosovo B	850	1360	<1.4	>0.71	<0.14	>7	<0.014	>70
		950	1425	<0.18	>5.5	<0.024	>40	<0.0024	>400
		1050	1575	<0.01	>100	<0.003	>300	<0.0003	>3000
9.	Niš 2 - Kragujevac	850	1360	<2	>0.5	<0.2	>5	<0.02	>50
		950	1425	<0.25	>4	<0.03	>30	<0.003	>300
		1050	1575	<0.012	>80	<0.003	>300	<0.0003	>3000

11.2.2.2.2. Parametri pouzdanosti izolacije nadzemnih vodova 220 kV za proračunima utvrđene sklopne prenapone

Istraživanja prenapona pri uključenju neopterećenih vodova, 1APU i 3APU su izvršena na dvanaest nadzemnih vodova 220 kV u SR Jugoslaviji i to: "Niš - Leskovac 2" (39 km), "Niš 2 - Kruševac 1" (72 km), "Beograd 8 - Pančevo 2" (14 km), "Beograd 8 - Beograd 17" (9.2 km), "Beograd 8 - Smederevo 3" (37 km), "Beograd 3 - Obrenovac" (33 km), "Beograd 3 - Beograd 8" (10.6 km), "Beograd 3 - Bajina Bašta" (145 km), "Požega - Kraljevo 3" (65 km), "Požega - Bajina Bašta" (49 km), "Požega - Pljevlja 2" (92 km) i "Požega - Čačak 3" (31 km). 1APU i 3APU su izvođena za sve vodove za stanja preostalih napona na njihovim fazama data za slučajeve suve i vlažne izolacije, kao i za vodove 400 kV. Pretpostavljeno je da su mreže 400 kV, 220 kV i 110 kV u normalnom radu i ekvivalentiranja u susjednim TS, pored onih u kojima su izvođena uključenja prekidača vodova, su izvršena u skladu sa tim.

Na osnovu utvrđenih napona na kraju posmatranih deonica voda za svaku operaciju uključenja neopterećenog voda, 1APU i 3APU su izračunati rizici preskoka na izolacijama voda. Pretpostavljeno je da sve fazne izolacije na deonici voda imaju iste napone jednake naponima utvrđenim na kraju deonice. Rizik preskoka pri uključenju neopterećenog voda, odnosno 1APU, odnosno 3APU je utvrđen kao i za vodove 400 kV iz izraza (11.2.2.2.1.1.).

Verovatnoće preskoka su određene iz izraza (11.2.2.1.1.4.), gde u_i predstavlja maksimalnu vrednost prenapona na posmatranoj izolaciji pri razmatranoj operaciji uključenja.

Rizici preskoka su izračunati za suve i vlažne izolacije vodova, koristeći vrednosti parametara krivih efekta date u tabeli 11.2.1.1. Preko navedenih vrednosti su obuhvaćeni koeficijent sigurnosti, koji uvažava starenje i neke druge nepoznate faktore koji dovode do sniženja podnosivih napona izolacije, i koeficijent visinske korekcije za prosečnu nadmorsku visinu vodova od 400 m.

U tabeli 11.2.2.2.1. su date maksimalne vrednosti prenapona izračunate na kraju istraživanih nadzemnih vodova 220 kV sa suvom i vlažnom izolacijom pri njihovom uključenju u neopterećenom stanju, 1APU i 3APU, a u tabeli 11.2.2.2.2. ustanovljeni rizici preskoka izolacije.

Na osnovu statističkih podataka poslednjih deset godina o događajima na vodovima 220 kV "Elektroistoka" ustanovljeno je sledeće:

- prosečan broj APU (obuhvaćeni su zajedno 1APU i 3APU) je ispod 5 na 100 km vodova 220 kV godišnje; uočen je porast APU u poslednje dve godine; u 1994.god. i 1995.god. broj APU je respektivno 6.78 i 7.11 na 100 km godišnje,
- prosečan broj (N_U) "ručnih" uključenja vodova je oko 6 godišnje.

Napred navedeni podaci su poslužili za ulazne podatke potrebne za izračunavanje, pored ustanovljenih rizika preskoka, ostalih parametara pouzdanosti rada vodova 220 kV. Pretpostavljeno je da je odnos broja 1APU i 3APU $N_{1APU}/N_{3APU}=6:1$ i da je broj operacija prekidača voda sa izolacijom u vlažnom stanju 4 puta veći nego kada je izolacija u suvom stanju. U proračunu su usvojeni sledeći podaci: $N_U=10$ uključenja godišnje i $N_{APU}=7$ APU na 100 km godišnje, od čega $N_{1APU}=6$ 1APU na 100 km godišnje i $N_{3APU}=1$ 3APU na 100 km godišnje.

Očekivani godišnji brojevi preskoka (N_p), ispada (N_i) i oštećenja (N_{ot}) i prosečni intervali vremena između dva preskoka (T_p), ispada (T_i) i oštećenja (T_{ot}) su određeni, kao i za vodove 400 kV, iz izraza (11.2.2.2.1.2.), (11.2.2.2.1.3.), (11.2.2.2.1.4.), (11.2.2.2.1.5.), (11.2.2.2.1.6.) i (11.2.2.2.1.7.) i dati u tabeli 11.2.2.2.3.

Iz tabele 11.2.2.2.3. se vidi da je pouzdanost rada vodova 220 kV veoma visoka za izolaciju nazivnih kratkotrajnih podnosivih napona industrijske frekvencije 460 kV_{eff} i 395 kV_{eff}, sasvim zadovoljavajuća za izolaciju 360 kV_{eff} i prihvatljiva za izolaciju 325 kV_{eff}. Izolacija vodova nazivnog kratkotrajnog podnosivog napona industrijske frekvencije 275 kV_{eff} ne pruža adekvatnu pouzdanost rada. Međutim svi pretpostavljeni ulazni podaci za proračun išli su u korist povećanja rizika preskoka te postoji mogućnost, ako se ustanove realniji ulazni podaci, da pouzdanost rada vodova 220 kV bude prihvatljiva i sa izolacijom 275 kV_{eff}.

Tabela 11.2.2.2.1. Maksimalni fazni prenaponi na kraju nadzemnih vodova pri njihovom uključenju u neopterećenom stanju, 1APU i 3APU

Redni broj	Nadzemni vod 220 kV	Maksimalni fazni prenaponi na nadzemnim vodovima 220 kV				
		U (kV)	$U_{1APU,v}$ (kV)	$U_{1APU,s}$ (kV)	$U_{3APU,v}$ (kV)	$U_{3APU,s}$ (kV)
1.	Niš 2- Leskovac 2 (39 km)	312	296	317	355	400
2.	Niš 2 - Kruševac 1 (72 km)	352	329	362	396	461
3.	Beograd 8 - Pančevo 2 (14 km)	300	290	305	280	321
4.	Beograd 8 - Beograd 17 (9.2 km)	260	242	265	270	315
5.	Beograd 8 - Smederevo 3 (37 km)	315	296	322	330	395
6.	Beograd 3 - Obrenovac (33 km)	310	300	325	335	405
7.	Beograd 3 - Beograd 8 (1.6 km)	261	239	261	275	318
8.	Beograd 3 - Bajina Bašta (145 km)	380	356	399	425	515
9.	Požega - Kraljevo 3 (65 km)	354	336	379	398	471
10.	Požega - Bajina Bašta (49 km)	348	332	361	410	498
11.	Požega - Pljevlja 2 (92 km)	352	323	360	400	469
12.	Požega - Čačak 3 (31 km)	353	308	363	390	453

Tabela 11.2.2.2.2. Rizici preskoka na nadzemnim vodovima 220 kV sa suvom i vlažnom izolacijom pri njihovom uključenju u neopterećenom stanju, 1APU i 3APU (uvaženo starenje izolacije i visinska korekcija za prosečnu nadmorsku visinu vodova od 400 m).

Redni broj	Nadzemni vod 220 kV	Kratkotrajni podnosivi napon industrijske frekvencije	Rizici preskoka na nadzemnim vodovima 220 kV ($R_{U,v}$, $R_{U,s}$ - rizici preskoka na vodu sa suvom i vlažnom izolacijom pri uključenju u neopterećenom stanju; $R_{1APU,v}$, $R_{3APU,v}$ - rizici preskoka na vodu sa vlažnom izolacijom pri 1APU i 3APU; $R_{1APU,s}$, $R_{3APU,s}$ - rizici preskoka na vodu sa suvom izolacijom pri 1APU i 3APU)					
			$U_{n,p,f}$ kV	$R_{U,v}$	$R_{U,s}$	$R_{1APU,v}$	$R_{1APU,s}$	$R_{3APU,v}$
1.	Niš 2 - Leskovac 2 (39 km)	275	$1.8 \cdot 10^{-2}$	$9.2 \cdot 10^{-3}$	$5.8 \cdot 10^{-2}$	$1.3 \cdot 10^{-2}$	$2.8 \cdot 10^{-1}$	$1.7 \cdot 10^{-1}$
		325	$1.1 \cdot 10^{-3}$	$2.1 \cdot 10^{-5}$	$2.5 \cdot 10^{-4}$	$3.8 \cdot 10^{-5}$	$2.6 \cdot 10^{-2}$	$4.1 \cdot 10^{-2}$
		360	$2.1 \cdot 10^{-5}$	$3.3 \cdot 10^{-7}$	$4.7 \cdot 10^{-6}$	$6.5 \cdot 10^{-7}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$1.9 \cdot 10^{-3}$
		395	$3.3 \cdot 10^{-7}$	$5.4 \cdot 10^{-9}$	$7.3 \cdot 10^{-8}$	$1.1 \cdot 10^{-8}$	$2.2 \cdot 10^{-5}$	$4.8 \cdot 10^{-5}$
		460	$1.5 \cdot 10^{-9}$	$2.2 \cdot 10^{-11}$	$3.2 \cdot 10^{-10}$	$4.3 \cdot 10^{-11}$	$1.1 \cdot 10^{-7}$	$2.2 \cdot 10^{-7}$
2.	Niš 2 - Kruševac 1 (72 km)	275	$6.9 \cdot 10^{-1}$	$3.1 \cdot 10^{-1}$	$2.6 \cdot 10^{-1}$	$1.6 \cdot 10^{-1}$	$7.1 \cdot 10^{-1}$	$3.3 \cdot 10^{-1}$
		325	$8 \cdot 10^{-2}$	$2.6 \cdot 10^{-3}$	$1.3 \cdot 10^{-2}$	$5.9 \cdot 10^{-3}$	$2.2 \cdot 10^{-1}$	$1.8 \cdot 10^{-1}$
		360	$2.6 \cdot 10^{-3}$	$5.3 \cdot 10^{-5}$	$3.5 \cdot 10^{-4}$	$1.4 \cdot 10^{-4}$	$5.2 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{-1}$
		395	$5.3 \cdot 10^{-5}$	$9.6 \cdot 10^{-7}$	$6.4 \cdot 10^{-6}$	$2.9 \cdot 10^{-6}$	$2.4 \cdot 10^{-3}$	$1.1 \cdot 10^{-2}$
		460	$2.6 \cdot 10^{-7}$	$3.7 \cdot 10^{-9}$	$3 \cdot 10^{-8}$	$1.2 \cdot 10^{-8}$	$1.8 \cdot 10^{-5}$	$9 \cdot 10^{-5}$
3.	Beograd 8 - Pančevo 2 (14 km)	275	$5.9 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-3}$	$2.1 \cdot 10^{-3}$	$2.7 \cdot 10^{-3}$	$1.2 \cdot 10^{-2}$	$8.2 \cdot 10^{-2}$
		325	$2.1 \cdot 10^{-4}$	$3.7 \cdot 10^{-5}$	$7.3 \cdot 10^{-5}$	$6.5 \cdot 10^{-6}$	$1.7 \cdot 10^{-3}$	$9.2 \cdot 10^{-3}$
		360	$3.7 \cdot 10^{-6}$	$5.7 \cdot 10^{-7}$	$1.3 \cdot 10^{-7}$	$1 \cdot 10^{-8}$	$7.3 \cdot 10^{-5}$	$5.5 \cdot 10^{-4}$
		395	$5.7 \cdot 10^{-8}$	$9.3 \cdot 10^{-10}$	$2 \cdot 10^{-9}$	$1.7 \cdot 10^{-10}$	$2.1 \cdot 10^{-7}$	$9.4 \cdot 10^{-6}$
		460	$2.5 \cdot 10^{-10}$	$4.1 \cdot 10^{-12}$	$9 \cdot 10^{-12}$	$7.1 \cdot 10^{-13}$	$9.2 \cdot 10^{-9}$	$3.7 \cdot 10^{-8}$
4.	Beograd 8 - Beograd 17 (9.2 km)	275	$1.2 \cdot 10^{-4}$	$2.7 \cdot 10^{-5}$	$6 \cdot 10^{-5}$	$4.3 \cdot 10^{-5}$	$6.2 \cdot 10^{-4}$	$2.2 \cdot 10^{-3}$
		325	$2.1 \cdot 10^{-6}$	$7.1 \cdot 10^{-7}$	$1.2 \cdot 10^{-6}$	$9.2 \cdot 10^{-7}$	$5.2 \cdot 10^{-6}$	$1.2 \cdot 10^{-5}$
		360	$2.4 \cdot 10^{-8}$	$1.8 \cdot 10^{-9}$	$7 \cdot 10^{-9}$	$3.1 \cdot 10^{-9}$	$6.2 \cdot 10^{-8}$	$3.4 \cdot 10^{-7}$
		395	$3.1 \cdot 10^{-10}$	$1.2 \cdot 10^{-11}$	$5.1 \cdot 10^{-11}$	$2.8 \cdot 10^{-11}$	$8.1 \cdot 10^{-10}$	$5.2 \cdot 10^{-9}$
		460	$4.2 \cdot 10^{-12}$	$6.7 \cdot 10^{-13}$	$1.2 \cdot 10^{-12}$	$8.5 \cdot 10^{-13}$	$7.7 \cdot 10^{-12}$	$6.5 \cdot 10^{-11}$
5.	Beograd 8 - Smederevo (37 km)	275	$2.5 \cdot 10^{-1}$	$1.3 \cdot 10^{-2}$	$8.7 \cdot 10^{-2}$	$2.9 \cdot 10^{-2}$	$3.2 \cdot 10^{-1}$	$1.7 \cdot 10^{-1}$
		325	$1.5 \cdot 10^{-3}$	$2.9 \cdot 10^{-5}$	$4.5 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-4}$	$8.3 \cdot 10^{-3}$	$4.1 \cdot 10^{-2}$
		360	$2.9 \cdot 10^{-5}$	$4.6 \cdot 10^{-7}$	$8.5 \cdot 10^{-6}$	$1.8 \cdot 10^{-6}$	$2.1 \cdot 10^{-4}$	$1.8 \cdot 10^{-3}$
		395	$4.6 \cdot 10^{-7}$	$7.5 \cdot 10^{-9}$	$1.3 \cdot 10^{-7}$	$3 \cdot 10^{-8}$	$3.8 \cdot 10^{-6}$	$4.4 \cdot 10^{-5}$
		460	$2 \cdot 10^{-9}$	$3.1 \cdot 10^{-11}$	$5.9 \cdot 10^{-10}$	$1.2 \cdot 10^{-10}$	$1.8 \cdot 10^{-8}$	$2 \cdot 10^{-7}$

Tabela 11.2.2.2.2.2. Rizici preskoka na nadzemnim vodovima 220 kV sa suvom i vlažnom izolacijom pri njihovom uključenju u neopterećenom stanju, 1APU i 3APU (uvaženo starenje izolacije i visinska korekcija za prosečnu nadmorsku visinu vodova od 400 m).

Redni broj	Nadzemni vod 220 kV	Kratkotrajni podnosivi napon industrijske frekvencije $U_{n,p,f}$ kV	Rizici preskoka na nadzemnim vodovima 220 kV ($R_{U,v}$, $R_{U,s}$ - rizici preskoka na vodu sa suvom i vlažnom izolacijom pri uključenju u neopterećenom stanju; $R_{1APU,v}$, $R_{3APU,v}$ - rizici preskoka na vodu sa vlažnom izolacijom pri 1APU i 3APU; $R_{1APU,s}$, $R_{3APU,s}$ - rizici preskoka na vodu sa suvom izolacijom pri 1APU i 3APU)					
			$R_{U,v}$	$R_{U,s}$	$R_{1APU,v}$	$R_{1APU,s}$	$R_{3APU,v}$	$R_{3APU,s}$
6.	Beograd 3 - Obrenovac (33 km)	275	$2.4 \cdot 10^{-1}$	$1.4 \cdot 10^{-2}$	$9.1 \cdot 10^{-2}$	$3.3 \cdot 10^{-2}$	$3.8 \cdot 10^{-1}$	$1.9 \cdot 10^{-1}$
		325	$1.7 \cdot 10^{-3}$	$4.1 \cdot 10^{-5}$	$6.5 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-1}$	$9.1 \cdot 10^{-3}$	$4.8 \cdot 10^{-2}$
		360	$3.1 \cdot 10^{-5}$	$5.1 \cdot 10^{-7}$	$9.7 \cdot 10^{-6}$	$3.1 \cdot 10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-4}$	$2.1 \cdot 10^{-3}$
		395	$4.8 \cdot 10^{-7}$	$8.1 \cdot 10^{-9}$	$2.1 \cdot 10^{-7}$	$8 \cdot 10^{-8}$	$5.2 \cdot 10^{-6}$	$4.8 \cdot 10^{-5}$
		460	$2.2 \cdot 10^{-9}$	$4.7 \cdot 10^{-11}$	$7 \cdot 10^{-10}$	$3 \cdot 10^{-10}$	$2.2 \cdot 10^{-8}$	$2.5 \cdot 10^{-7}$
7.	Beograd 3 - Beograd 8 (10.6 km)	275	$7.5 \cdot 10^{-5}$	$1.4 \cdot 10^{-6}$	$3.6 \cdot 10^{-5}$	$4.3 \cdot 10^{-6}$	$8.8 \cdot 10^{-4}$	$2.1 \cdot 10^{-3}$
		325	$1.2 \cdot 10^{-7}$	$1.9 \cdot 10^{-9}$	$5.1 \cdot 10^{-8}$	$5.9 \cdot 10^{-9}$	$1.8 \cdot 10^{-6}$	$5.4 \cdot 10^{-6}$
		360	$1.9 \cdot 10^{-9}$	$2.9 \cdot 10^{-11}$	$7.9 \cdot 10^{-10}$	$8.8 \cdot 10^{-11}$	$2.9 \cdot 10^{-8}$	$8.9 \cdot 10^{-8}$
		395	$2.9 \cdot 10^{-11}$	$5.7 \cdot 10^{-13}$	$1.2 \cdot 10^{-11}$	$1.6 \cdot 10^{-12}$	$4.3 \cdot 10^{-10}$	$1.5 \cdot 10^{-9}$
		460	$2.1 \cdot 10^{-13}$	$8.1 \cdot 10^{-14}$	$1.7 \cdot 10^{-13}$	$1.2 \cdot 10^{-13}$	$2.1 \cdot 10^{-12}$	$6 \cdot 10^{-12}$
8.	Beograd 3 - Bajina Bašta (145 km)	275	$7.2 \cdot 10^{-1}$	$3.3 \cdot 10^{-1}$	$4.1 \cdot 10^{-1}$	$2 \cdot 10^{-1}$	$5.5 \cdot 10^{-1}$	$5 \cdot 10^{-1}$
		325	$1.2 \cdot 10^{-1}$	$6.2 \cdot 10^{-3}$	$6.2 \cdot 10^{-2}$	$4.2 \cdot 10^{-2}$	$2.9 \cdot 10^{-1}$	$3.4 \cdot 10^{-1}$
		360	$6.2 \cdot 10^{-2}$	$7.2 \cdot 10^{-3}$	$6.8 \cdot 10^{-3}$	$3.1 \cdot 10^{-3}$	$8 \cdot 10^{-2}$	$1.5 \cdot 10^{-1}$
		395	$5.8 \cdot 10^{-3}$	$4.9 \cdot 10^{-4}$	$4.2 \cdot 10^{-4}$	$3.1 \cdot 10^{-4}$	$6 \cdot 10^{-3}$	$2.6 \cdot 10^{-2}$
		460	$1.52 \cdot 10^{-4}$	$2.8 \cdot 10^{-6}$	$2.3 \cdot 10^{-6}$	$1.5 \cdot 10^{-6}$	$7 \cdot 10^{-4}$	$5.8 \cdot 10^{-3}$
9.	Požega - Kraljevo (65 km)	275	$4.1 \cdot 10^{-1}$	$1.3 \cdot 10^{-1}$	$3.5 \cdot 10^{-1}$	$2.1 \cdot 10^{-1}$	$5.3 \cdot 10^{-1}$	$3.6 \cdot 10^{-1}$
		325	$3.3 \cdot 10^{-2}$	$1.2 \cdot 10^{-3}$	$1.9 \cdot 10^{-2}$	$1.5 \cdot 10^{-2}$	$1.9 \cdot 10^{-1}$	$2.3 \cdot 10^{-1}$
		360	$1.2 \cdot 10^{-3}$	$2.6 \cdot 10^{-5}$	$1.1 \cdot 10^{-3}$	$4.7 \cdot 10^{-4}$	$3.6 \cdot 10^{-2}$	$9 \cdot 10^{-2}$
		395	$2.6 \cdot 10^{-5}$	$4.8 \cdot 10^{-7}$	$2.2 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$1.5 \cdot 10^{-3}$	$8 \cdot 10^{-3}$
		460	$1.3 \cdot 10^{-7}$	$1.9 \cdot 10^{-9}$	$1.1 \cdot 10^{-7}$	$4.3 \cdot 10^{-8}$	$1.1 \cdot 10^{-5}$	$7 \cdot 10^{-5}$
10.	Požega - Bajina Bašta (49 km)	275	$3.7 \cdot 10^{-1}$	$9.7 \cdot 10^{-2}$	$1.8 \cdot 10^{-1}$	$1.8 \cdot 10^{-1}$	$3.1 \cdot 10^{-1}$	$4.8 \cdot 10^{-1}$
		325	$2.1 \cdot 10^{-2}$	$6.7 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-2}$	$1.9 \cdot 10^{-3}$	$1.7 \cdot 10^{-1}$	$3.1 \cdot 10^{-1}$
		360	$6.7 \cdot 10^{-4}$	$1.3 \cdot 10^{-5}$	$2.8 \cdot 10^{-4}$	$4.1 \cdot 10^{-5}$	$2.8 \cdot 10^{-2}$	$1.9 \cdot 10^{-1}$
		395	$1.3 \cdot 10^{-5}$	$2.4 \cdot 10^{-7}$	$5.1 \cdot 10^{-6}$	$7.8 \cdot 10^{-7}$	$1.4 \cdot 10^{-3}$	$3.4 \cdot 10^{-2}$
		460	$6.6 \cdot 10^{-8}$	$9.5 \cdot 10^{-10}$	$2.4 \cdot 10^{-8}$	$3.1 \cdot 10^{-9}$	$1.2 \cdot 10^{-5}$	$4.4 \cdot 10^{-4}$

Tabela 11.2.2.2.2.2. Rizici preskoka na nadzemnim vodovima 220 kV sa suvom i vlažnom izolacijom pri njihovom uključenju u neopterećenom stanju, 1APU i 3APU (uvaženo starenje izolacije i visinska korekcija za prosečnu nadmorsku visinu vodova od 400 m).

Redni broj	Nadzemni vod 220 kV	Kratkotrajni podnosivi napon industrijske frekvencije $U_{n,p,f}$ kV	Rizici preskoka na nadzemnim vodovima 220 kV ($R_{U,v}$, $R_{U,s}$ - rizici preskoka na vodu sa suvom i vlažnom izolacijom pri uključenju u neopterećenom stanju; $R_{1APU,v}$, $R_{3APU,v}$ - rizici preskoka na vodu sa vlažnom izolacijom pri 1APU i 3APU; $R_{1APU,s}$, $R_{3APU,s}$ - rizici preskoka na vodu sa suvom izolacijom pri 1APU i 3APU)					
			$R_{U,v}$	$R_{U,s}$	$R_{1APU,v}$	$R_{1APU,s}$	$R_{3APU,v}$	$R_{3APU,s}$
11.	Požega - Pljevlja 2 (92 km)	275	$3.9 \cdot 10^{-1}$	$9 \cdot 10^{-2}$	$3.3 \cdot 10^{-1}$	$1.8 \cdot 10^{-1}$	$5.6 \cdot 10^{-1}$	$4.7 \cdot 10^{-1}$
		325	$2.1 \cdot 10^{-2}$	$7.7 \cdot 10^{-4}$	$2.2 \cdot 10^{-2}$	$6.5 \cdot 10^{-3}$	$1.7 \cdot 10^{-1}$	$2.8 \cdot 10^{-1}$
		360	$7.7 \cdot 10^{-4}$	$1.6 \cdot 10^{-5}$	$5.7 \cdot 10^{-4}$	$1.6 \cdot 10^{-4}$	$3.4 \cdot 10^{-2}$	$1.2 \cdot 10^{-1}$
		395	$1.6 \cdot 10^{-5}$	$2.9 \cdot 10^{-7}$	$4.5 \cdot 10^{-6}$	$3.1 \cdot 10^{-6}$	$1.8 \cdot 10^{-3}$	$1.4 \cdot 10^{-2}$
		460	$7.9 \cdot 10^{-8}$	$1.1 \cdot 10^{-9}$	$4.6 \cdot 10^{-8}$	$1.2 \cdot 10^{-8}$	$1.3 \cdot 10^{-5}$	$1.2 \cdot 10^{-4}$
12.	Požega - Čačak 3 (31 km)	275	$2.4 \cdot 10^{-1}$	$3.8 \cdot 10^{-2}$	$9 \cdot 10^{-2}$	$6.8 \cdot 10^{-2}$	$3.7 \cdot 10^{-1}$	$3.8 \cdot 10^{-1}$
		325	$7.6 \cdot 10^{-3}$	$2.5 \cdot 10^{-4}$	$8 \cdot 10^{-4}$	$1.3 \cdot 10^{-3}$	$7.8 \cdot 10^{-2}$	$2 \cdot 10^{-1}$
		360	$2.5 \cdot 10^{-4}$	$5.2 \cdot 10^{-6}$	$1.6 \cdot 10^{-5}$	$3.1 \cdot 10^{-5}$	$6.7 \cdot 10^{-3}$	$4.2 \cdot 10^{-2}$
		395	$5.2 \cdot 10^{-6}$	$9.6 \cdot 10^{-8}$	$2.7 \cdot 10^{-7}$	$6.1 \cdot 10^{-7}$	$2.1 \cdot 10^{-4}$	$2.1 \cdot 10^{-3}$
		460	$2.6 \cdot 10^{-8}$	$3.8 \cdot 10^{-10}$	$1.2 \cdot 10^{-9}$	$2.4 \cdot 10^{-9}$	$1.4 \cdot 10^{-6}$	$1.4 \cdot 10^{-5}$

Tabela 11.2.2.2.3. Očekivani godišnji brojevi preskoka (N_p), ispada (N_i) i oštećenja (N_{ot}) i prosečni intervali vremena između dva uzastopna preskoka (T_p), ispada (T_i) i oštećenja (T_{ot}) pri sklopnim operacijama na istraživanim nadzemnim vodovima 220 kV sa izolacijom različitih standardizovanih nazivnih kratkotrajnih podnosivih napona industrijske frekvencije ($U_{n,p,f}$) (uvaženo starenje izolacije i visinska korekcija za prosečnu nadmorsku visinu vodova od 400 m).

Redni broj	Nadzemni vod	$U_{n,p,f}$ (kV _{eff})	N_p	T_p (god.)	N_i	T_i (god.)	N_{ot}	T_{ot} (god.)
1.	Niš 2 - Leskovac 2 (39 km)	275	1.67	0.6	0.22	4.5	0.022	45
		325	0.021	48	0.012	83	0.0012	833
		360	<0.001	>1000	<0.001	>1000	<0.0001	>10000
		395	<0.001	>1000	<0.001	>1000	<0.0001	>10000
		460	<0.001	>1000	<0.001	>1000	<0.0001	>10000
2.	Niš 2 - Kruševac 1 (72 km)	275	7.6	0.13	1.5	0.67	0.15	6.7
		325	0.85	1.2	0.2	5	0.02	50
		360	0.066	15	0.046	22	0.0046	217
		395	0.0034	294	0.003	333	0.0003	3333
		460	<0.001	>1000	<0.001	>1000	<0.0001	>10000
3.	Beograd 8 - Pančevi 2 (14 km)	275	0.06	17	0.012	83	0.0012	833
		325	0.0023	435	<0.001	>1000	<0.0001	>10000
		360	<0.001	>1000	<0.001	>1000	<0.0001	>10000
		395	<0.001	>1000	<0.001	>1000	<0.0001	>10000
		460	<0.001	>1000	<0.001	>1000	<0.0001	>10000
4.	Beograd 8 - Beograd 17 (9.2 km)	275	0.0012	833	<0.001	>1000	<0.0001	>10000
		325	<0.001	>1000	<0.001	>1000	<0.0001	>10000
		360	<0.001	>1000	<0.001	>1000	<0.0001	>10000
		395	<0.001	>1000	<0.001	>1000	<0.0001	>10000
		460	<0.001	>1000	<0.001	>1000	<0.0001	>10000
5.	Beograd 8 - Smederevo (37 km)	275	2.3	0.43	0.27	3.7	0.027	37
		325	0.018	56	0.006	167	0.0006	1667
		360	<0.001	>1000	<0.001	>1000	<0.0001	>10000
		395	<0.001	>1000	<0.001	>1000	<0.0001	>10000
		460	<0.001	>1000	<0.001	>1000	<0.0001	>10000
6.	Beograd 3 - Obrenovac (33 km)	275	2.5	0.43	0.27	3.7	0.027	37
		325	0.02	50	0.007	143	0.0007	1429
		360	<0.001	>1000	<0.001	>1000	<0.0001	>10000
		395	<0.001	>1000	<0.001	>1000	<0.0001	>10000
		460	<0.001	>1000	<0.001	>1000	<0.0001	>10000
7.	Beograd 3 - Beograd 8 (10.6 km)	275	<0.001	>1000	<0.001	>1000	<0.0001	>10000
		325	<0.001	>1000	<0.001	>1000	<0.0001	>10000
		360	<0.001	>1000	<0.001	>1000	<0.0001	>10000
		395	<0.001	>1000	<0.001	>1000	<0.0001	>10000
		460	<0.001	>1000	<0.001	>1000	<0.0001	>10000
8.	Beograd 3 - Bajina Bašta (145 km)	275	10	0.1	4	0.25	0.4	2.5
		325	2	0.5	0.94	1.06	0.094	10.6
		360	0.7	1.43	0.19	5.3	0.019	52.6
		395	0.065	15.4	0.018	55.6	0.0018	556
		460	0.0037	270	0.0025	400	0.00025	4000

Tabela 11.2.2.2.3. Očekivani godišnji brojevi preskoka (N_p), ispada (N_i) i oštećenja (N_{ot}) i prosečni intervali vremena između dva uzastopna preskoka (T_p), ispada (T_i) i oštećenja (T_{ot}) pri sklopnim operacijama na istraživanim nadzemnim vodovima 220 kV sa izolacijom različitih standardizovanih nazivnih kratkotrajnih podnosivih napona industrijske frekvencije ($U_{n,p,f}$) (uvaženo starenje izolacije i visinska korekcija za prosečnu nadmorsku visinu vodova od 400 m).

Redni broj	Nadzemni vod	$U_{n,p,f}$ (kV _{eff})	N_p	T_p (god.)	N_i	T_i (god.)	N_{ot}	T_{ot} (god.)
9.	Požega - Kraljevo (65 km)	275	5	0.2	1.6	0.63	0.16	6.3
		325	0.47	2.1	0.2	5	0.02	50
		360	0.044	23	0.034	29	0.0034	294
		395	0.0021	476	0.0019	526	0.00019	5263
		460	<0.001	>1000	<0.001	>1000	<0.0001	>10000
10.	Požega - Bajina Bašta (49 km)	275	3.8	0.26	0.7	1.4	0.07	14
		325	0.29	3.4	0.12	8.3	0.012	83
		360	0.036	28	0.03	33	0.003	333
		395	0.004	250	0.004	250	0.0004	2500
		460	<0.001	>1000	<0.001	>1000	<0.0001	>10000
11.	Požega - Pljevlja 2 (92 km)	275	5.5	0.18	2.2	0.45	0.22	4.5
		325	0.45	2.2	0.28	3.6	0.028	36
		360	0.05	20	0.05	20	0.005	200
		395	0.004	250	0.004	250	0.0004	2500
		460	<0.001	>1000	<0.001	>1000	<0.0001	>10000
12.	Požega - Čačak 3 (31 km)	275	2.3	0.43	0.28	3.6	0.028	36
		325	0.095	10.5	0.033	30	0.0033	303
		360	0.006	167	0.004	250	0.0004	2500
		395	<0.001	>1000	<0.001	>1000	<0.0001	>10000
		460	<0.001	>1000	<0.001	>1000	<0.0001	>10000

11.2.2.2.3. Parametri pouzdanosti izolacije nadzemnih vodova 110 kV za proračunima uvrđene sklopne prenapone

Istraživanja prenapona pri uključenju neopterećenih vodova, 1APU i 3APU su izvršena na petnaest nadzemnih vodova 110 kV u SR Jugoslaviji i to: "Niš 2 - Leskovac 4" (48 km), "Niš 2 - Pirot" (62 km), "Niš 2 - Niš 3" (6.3 km), "Niš 2 - Niš 1" (14.5 km), "Bor 2 - Majdanpek 2" (44 km), "Bor 2 - Zaječar 2" (20 km), "Bor 2 - Veliki Krivelj" (8.8 km), "Požega - Sevojno" (15 km), "Požega - Beljina" (54 km), "Požega - Guča" (16 km), "Požega - Ivanjica" (29 km), "Beograd 3 - Smederevo 2" (42 km), "Beograd 3 - Beograd 1" (16 km), "Beograd 3 - Beograd 18" (30 km) i "Beograd 3 - Pančevo 1" (25 km). 1APU i 3APU su izvođena za sve vodove za stanja preostalih napona na njihovim fazama data za slučajeve suve i vlažne izolacije kao i za vodove 400 kV i 220 kV. Ovo je urađeno iako se na krajevima razmatranih vodova 110 kV nalaze induktivni naponski transformatori, pa se 1APU i 3APU dešavaju kada nema preostalog napona na vodu. Pretpostavljeno stanje odgovara vodovima sa kapacitivnim naponskim transformatorima na njihovim krajevima i tada su veća naprezanja izolacije pri 1APU i 3APU.

Pretpostavljeno je da su mreže 400 kV, 220 kV i 110 kV u normalnom radu i ekvivalentiranja u susednim TS, pored onih u kojima su izvođena uključenja prekidača vodova, su izvršena u skladu sa tim.

U tabeli 11.2.2.2.3.1. su date maksimalne vrednosti prenapona izračunate na kraju istraživanih nadzemnih vodova 110 kV sa suvom i vlažnom izolacijom pri njihovom uključenju u neopterećenom stanju, 1APU i 3APU.

Rizici preskoka pri uključenju neopterećenih vodova, odnosno 1APU, odnosno 3APU za suhu i vlažnu izolaciju, koristeći vrednosti parametara krivih efekta date u tabeli 11.2.1.1., su utvrđeni iz izraza (11.2.2.2.1.) i dati su u tabeli 11.2.2.2.3.2. Preko vrednosti parametara krivih efekta iz tabele 11.2.1.1. su obuhvaćeni koeficijent sigurnosti, koji uvažava starenje i neke druge nepoznate faktore koji dovode do sniženja podnosivih napona izolacije, i koeficijent visinske korekcije za prosečnu nadmorsku visinu od 400 m.

Na osnovu statističkih podataka poslednjih deset godina o događajima na vodovima 110 kV "Elektroistoka" ustanovljeno je sledeće:

- prosečan broj APU (obuhvaćeni su zajedno 1APU i 3APU) je oko 9 na 100 km vodova 110 kV godišnje; uočen je porast APU u poslednje četiri godine; u 1992.god., 1993.god., 1994.god. i 1995.god. broj APU je respektivno 9.71, 10.46, 11.65 i 13.11 na 100 km godišnje,
- prosečan broj (N_U) "ručnih" uključenja vodova je oko 8 godišnje.

Napred navedeni podaci su poslužili za opredeljenje za ulazne podatke potrebne za izračunavanje, pored ustanovljenog rizika preskoka, ostalih parametara pouzdanosti rada vodova 110 kV. Pretpostavljeno je da je odnos broja 1APU i 3APU $N_{1APU}/N_{3APU}=3:1$ i da je broj operacija prekidača voda sa izolacijom u vlažnom stanju 4 puta veći nego kada je izolacija u suvom stanju. U proračunu su usvojeni sledeći podaci: $N_U=10$ I/god. uključenja godišnje i $N_{APU}=12$ APU na 100 km godišnje, od čega $N_{1APU}=9$ 1APU na 100 km godišnje i $N_{3APU}=3$ 3APU na 100 km godišnje.

Očekivani godišnji brojevi preskoka (N_p), ispada (N_i) i oštećenja (N_{ot}) i prosečni intervali vremena između dva uzastopna preskoka (T_p), ispada (T_i) i oštećenja (T_{ot}) su određeni, kao i za vodove 400 kV i 220 kV, iz izraza (11.2.2.2.1.2.), (11.2.2.2.1.3.), (11.2.2.2.1.4.), (11.2.2.2.1.5.), (11.2.2.2.1.6.) i (11.2.2.2.1.7.), i dati u tabeli 11.2.2.2.3.3.

Iz tabele 11.2.2.2.3.3. se vidi da je pouzdanost rada vodova 110 kV veoma visoka za izolaciju nazivnog kratkotrajnog podnosivog napona industrijske frekvencije 230 kV_{eff} i sasvim zadovoljavajuća za izolaciju 185 kV_{eff}.

Takođe su izračunati i parametri pouzdanosti za sadašnje stanje na vodovima 110 kV kada su na njihovim krajevima prisutni induktivni naponski transformatori. Rizici pri uključenjima neopterećenih

vodova sa vlažnom ($R_{U,v}$) i suvom ($R_{U,s}$) izolacijom dati u tabeli 11.2.2.2.3.2. ostaju isti i istovremeno predstavljaju rizike pri 3APU ($R_{3APU,v}=R_{U,v}$, $R_{3APU,s}=R_{U,s}$), jer posle isključenja za nekoliko desetina ms naponi na vodu padaju na nulu. Rizik pri 1APU sa vlažnom izolacijom na vodu ($R_{1APU,v}$) ostaje isti, a rizik pri 1APU sa suvom izolacijom ($R_{1APU,s}$) je znatno manji od ostalih rizika te nije ni uzet u izračunavanju parametara pouzdanosti. Ustanovljeno je da su prosečni intervali vremena između dva uzastopna ispada za sve razmatrane vodove sa izolacijom 185 kV_{eff} veći od 10 godina, a prosečni intervali vremena između dva uzastopna oštećenja veći od 100 godina. To pokazuje da bi pouzdanost rada postojećih vodova 110 kV u pogledu sklopnih prenapona bila znatna i kada bi imali izolaciju nazivnog kratkotrajnog podnosivog napona industrijske frekvencije 185 kV_{eff} umesto sadašnjeg 230 kV_{eff}.

Tabela 11.2.2.3.2.1. Maksimalni vremeni prenaponi na 110 kV vodovima sa različitim vrstama izolacije i razmatranim rizicima

Vod	Vrsta izolacije	Vrednost prenapona (kV)	Rizik pri 3APU		Rizik pri 1APU	
			$R_{3APU,v}$	$R_{3APU,s}$	$R_{1APU,v}$	$R_{1APU,s}$
1.	110 kV - 1. vrsta	185 (185)	100	100	100	100
2.	110 kV - 2. vrsta	185 (185)	100	100	100	100
3.	110 kV - 3. vrsta	185 (185)	100	100	100	100
4.	110 kV - 4. vrsta	185 (185)	100	100	100	100
5.	110 kV - 5. vrsta	185 (185)	100	100	100	100
6.	110 kV - 6. vrsta	185 (185)	100	100	100	100
7.	110 kV - 7. vrsta	185 (185)	100	100	100	100
8.	110 kV - 8. vrsta	185 (185)	100	100	100	100
9.	110 kV - 9. vrsta	185 (185)	100	100	100	100
10.	110 kV - 10. vrsta	185 (185)	100	100	100	100
11.	110 kV - 11. vrsta	185 (185)	100	100	100	100
12.	110 kV - 12. vrsta	185 (185)	100	100	100	100
13.	110 kV - 13. vrsta	185 (185)	100	100	100	100
14.	110 kV - 14. vrsta	185 (185)	100	100	100	100
15.	110 kV - 15. vrsta	185 (185)	100	100	100	100
16.	110 kV - 16. vrsta	185 (185)	100	100	100	100
17.	110 kV - 17. vrsta	185 (185)	100	100	100	100
18.	110 kV - 18. vrsta	185 (185)	100	100	100	100
19.	110 kV - 19. vrsta	185 (185)	100	100	100	100
20.	110 kV - 20. vrsta	185 (185)	100	100	100	100

Tabela 11.2.2.3.1. Maksimalni fazni prenaponi na kraju nadzemnih vodova pri njihovom uključenju u neopterećenom stanju, 1APU i 3APU

Redni broj	Nadzemni vod 110 kV	Maksimalni fazni prenaponi na nadzemnim vodovima 110 kV (U - uključenje neopterećenog voda sa suvom ili vlažnom izolacijom; $U_{1APU,s}$, $U_{3APU,s}$ - 1APU i 3APU voda sa suvom izolacijom; $U_{1APU,v}$, $U_{3APU,v}$ - 1APU i 3APU voda sa vlažnom izolacijom)				
		U (kV)	$U_{1APU,v}$ (kV)	$U_{1APU,s}$ (kV)	$U_{3APU,v}$ (kV)	$U_{3APU,s}$ (kV)
1.	Niš 2 - Leskovac 4 (48 km)	195	176	203	199	243
2.	Niš 2 - Pirod 2 (62 km)	205	187	215	210	255
3.	Niš 2 - Niš 3 (6.3 km)	170	167	179	185	224
4.	Niš 2 - Niš 1 (14.5 km)	177	172	197	192	233
5.	Bor 2 - Majdanpek 2 (44 km)	183	176	201	195	239
6.	Bor 2 - Zaječar 2 (20 km)	175	170	187	188	228
7.	Bor 2 - Veliki Krivelj (8.8 km)	175	169	185	186	225
8.	Požega - Sevojno (15 km)	164	161	173	182	226
9.	Požega - Beljina (54 km)	192	185	207	217	278
10.	Požega - Guča (16 km)	160	157	172	172	211
11.	Požega - Ivanjica (29 km)	176	174	188	201	245
12.	Beograd 3 - Smederevo 2 (42 km)	191	182	216	202	243
13.	Beograd 3 - Beograd 1 (16 km)	181	179	200	201	250
14.	Beograd 3 - Beograd 18 (30 km)	186	184	214	205	253
15.	Beograd 3 - Pančevo 1 (25 km)	185	178	202	201	248

Tabela 11.2.2.2.3.2. Rizici preskoka na nadzemnim vodovima 110 kV sa suvom i vlažnom izolacijom pri njihovom uključenju u neopterećenom stanju, 1APU i 3APU (uvaženo starenje izolacije i visinska korekcija za prosečnu nadmorsku visinu vodova od 400 m).

Redni broj	Nadzemni vod 110 kV	Kratkotrajni podnosivi napon industrijske frekvencije	Rizici preskoka na nadzemnim vodovima 110 kV ($R_{U,v}$, $R_{U,s}$ - rizici preskoka na vodu sa suvom i vlažnom izolacijom pri uključenju u neopterećenom stanju; $R_{1APU,v}$, $R_{3APU,v}$ - rizici preskoka na vodu sa vlažnom izolacijom pri 1APU i 3APU; $R_{1APU,s}$, $R_{3APU,s}$ - rizici preskoka na vodu sa suvom izolacijom pri 1APU i 3APU)					
			$U_{n,p,f}$ kV	$R_{U,v}$	$R_{U,s}$	$R_{1APU,v}$	$R_{1APU,s}$	$R_{3APU,v}$
1.	Niš 2 - Leskovac 4 (48 km)	185 230	$1.4 \cdot 10^{-2}$ $5.1 \cdot 10^{-6}$	$3.9 \cdot 10^{-4}$ $7.3 \cdot 10^{-8}$	$2.6 \cdot 10^{-3}$ $7.3 \cdot 10^{-7}$	$6.5 \cdot 10^{-3}$ $1.8 \cdot 10^{-6}$	$5.1 \cdot 10^{-2}$ $3.1 \cdot 10^{-5}$	$1.4 \cdot 10^{-1}$ $1.3 \cdot 10^{-3}$
2.	Niš 2 - Pirot 2 (62 km)	185 230	$3.2 \cdot 10^{-2}$ $6.8 \cdot 10^{-5}$	$1.2 \cdot 10^{-3}$ $7.5 \cdot 10^{-6}$	$2.1 \cdot 10^{-2}$ $5.2 \cdot 10^{-5}$	$2.8 \cdot 10^{-2}$ $1.3 \cdot 10^{-4}$	$9.5 \cdot 10^{-2}$ $8.6 \cdot 10^{-4}$	$3.2 \cdot 10^{-1}$ $7 \cdot 10^{-2}$
3.	Niš 2 - Niš 3 (6.3 km)	185 230	$1.7 \cdot 10^{-4}$ $3.9 \cdot 10^{-8}$	$3.6 \cdot 10^{-6}$ $5.5 \cdot 10^{-10}$	$5.9 \cdot 10^{-5}$ $1.4 \cdot 10^{-8}$	$1.3 \cdot 10^{-5}$ $2.3 \cdot 10^{-9}$	$1 \cdot 10^{-3}$ $3.5 \cdot 10^{-7}$	$1.6 \cdot 10^{-2}$ $1 \cdot 10^{-5}$
4.	Niš 2 - Niš 1 (14.5 km)	185 230	$1.1 \cdot 10^{-3}$ $2.7 \cdot 10^{-7}$	$2.4 \cdot 10^{-5}$ $3.8 \cdot 10^{-9}$	$3.3 \cdot 10^{-4}$ $8.3 \cdot 10^{-8}$	$6.7 \cdot 10^{-4}$ $1.6 \cdot 10^{-7}$	$6.1 \cdot 10^{-3}$ $2.6 \cdot 10^{-6}$	$6.4 \cdot 10^{-2}$ $8.6 \cdot 10^{-5}$
5.	Bor 2 - Majdanpek 2 (44 km)	185 230	$6.8 \cdot 10^{-3}$ $1.9 \cdot 10^{-6}$	$1.6 \cdot 10^{-4}$ $2.7 \cdot 10^{-8}$	$2.6 \cdot 10^{-3}$ $7.2 \cdot 10^{-7}$	$5.1 \cdot 10^{-3}$ $1.3 \cdot 10^{-6}$	$4.2 \cdot 10^{-2}$ $2.3 \cdot 10^{-5}$	$1.3 \cdot 10^{-1}$ $6.3 \cdot 10^{-4}$
6.	Bor 2 - Zaječar 2 (20 km)	185 230	$4 \cdot 10^{-4}$ $1.5 \cdot 10^{-7}$	$1.3 \cdot 10^{-5}$ $2 \cdot 10^{-9}$	$2.2 \cdot 10^{-4}$ $5.3 \cdot 10^{-8}$	$1.2 \cdot 10^{-6}$ $2.2 \cdot 10^{-8}$	$4.1 \cdot 10^{-3}$ $1.5 \cdot 10^{-6}$	$4.8 \cdot 10^{-2}$ $3.9 \cdot 10^{-5}$

Tabela 11.2.2.3.2. Rizici preskoka na nadzemnim vodovima 110 kV sa suvom i vlažnom izolacijom pri njihovom uključenju u neopterećenom stanju, 1APU i 3APU (uvaženo starenje izolacije i visinska korekcija za prosečnu nadmorsku visinu vodova od 400 m).

Redni broj	Nadzemni vod 110 kV	Kratkotrajni podnosivi napon industrijske frekvencije $U_{n,p,f}$ kV	Rizici preskoka na nadzemnim vodovima 110 kV ($R_{U,v}$, $R_{U,s}$ - rizici preskoka na vodu sa suvom i vlažnom izolacijom pri uključenju u neopterećenom stanju; $R_{1APU,v}$, $R_{3APU,v}$ - rizici preskoka na vodu sa vlažnom izolacijom pri 1APU i 3APU; $R_{1APU,s}$, $R_{3APU,s}$ - rizici preskoka na vodu sa suvom izolacijom pri 1APU i 3APU)					
			$R_{U,v}$	$R_{U,s}$	$R_{1APU,v}$	$R_{1APU,s}$	$R_{3APU,v}$	$R_{3APU,s}$
7.	Bor 2 - Veliki Krivelj (8.8 km)	185 230	$5.2 \cdot 10^{-4}$ $1.2 \cdot 10^{-7}$	$1.1 \cdot 10^{-5}$ $1.7 \cdot 10^{-9}$	$1.8 \cdot 10^{-4}$ $4.3 \cdot 10^{-8}$	$7.6 \cdot 10^{-5}$ $1.4 \cdot 10^{-8}$	$3.4 \cdot 10^{-3}$ $1.2 \cdot 10^{-6}$	$4.1 \cdot 10^{-2}$ $3 \cdot 10^{-5}$
8.	Požega - Sevojno (15 km)	185 230	$4.3 \cdot 10^{-5}$ $9 \cdot 10^{-9}$	$8.4 \cdot 10^{-7}$ $1.3 \cdot 10^{-10}$	$1.9 \cdot 10^{-5}$ $3.9 \cdot 10^{-9}$	$5.9 \cdot 10^{-6}$ $9.2 \cdot 10^{-10}$	$2 \cdot 10^{-3}$ $5.8 \cdot 10^{-7}$	$7.5 \cdot 10^{-2}$ $4.2 \cdot 10^{-5}$
9.	Požega - Beljina (54 km)	185 230	$2.7 \cdot 10^{-2}$ $1.1 \cdot 10^{-5}$	$8 \cdot 10^{-4}$ $1.5 \cdot 10^{-7}$	$1.6 \cdot 10^{-2}$ $6.3 \cdot 10^{-6}$	$1.4 \cdot 10^{-2}$ $6.1 \cdot 10^{-5}$	$8.1 \cdot 10^{-2}$ $5.6 \cdot 10^{-4}$	$2.6 \cdot 10^{-1}$ $6 \cdot 10^{-2}$
10.	Požega - Guča (16 km)	185 230	$6.8 \cdot 10^{-6}$ $1.4 \cdot 10^{-9}$	$1.3 \cdot 10^{-7}$ $2 \cdot 10^{-11}$	$6.5 \cdot 10^{-6}$ $1.3 \cdot 10^{-9}$	$4.1 \cdot 10^{-6}$ $6.5 \cdot 10^{-10}$	$1.5 \cdot 10^{-4}$ $3.8 \cdot 10^{-8}$	$5.5 \cdot 10^{-3}$ $1.9 \cdot 10^{-6}$
11.	Požega - Ivanjica (29 km)	185 230	$4.9 \cdot 10^{-4}$ $1.2 \cdot 10^{-7}$	$1.1 \cdot 10^{-5}$ $1.7 \cdot 10^{-9}$	$3.7 \cdot 10^{-4}$ $9.7 \cdot 10^{-8}$	$1.7 \cdot 10^{-4}$ $3.2 \cdot 10^{-8}$	$1.7 \cdot 10^{-2}$ $9.5 \cdot 10^{-6}$	$9.5 \cdot 10^{-2}$ $6.3 \cdot 10^{-4}$
12.	Beograd 3 - Smederevo 2 (42 km)	185 230	$2.7 \cdot 10^{-2}$ $1 \cdot 10^{-5}$	$7.7 \cdot 10^{-4}$ $1.4 \cdot 10^{-7}$	$8.2 \cdot 10^{-3}$ $2.7 \cdot 10^{-6}$	$1.8 \cdot 10^{-2}$ $1.9 \cdot 10^{-5}$	$7 \cdot 10^{-2}$ $8.4 \cdot 10^{-5}$	$1.3 \cdot 10^{-1}$ $1.4 \cdot 10^{-3}$

Tabela 11.2.2.3.2. Rizici preskoka na nadzemnim vodovima 110 kV sa suvom i vlažnom izolacijom pri njihovom uključenju u neopterećenom stanju, 1APU i 3APU (uvaženo starenje izolacije i visinska korekcija za prosečnu nadmorsku visinu vodova od 400 m).

Redni broj	Nadzemni vod 110 kV	Kratkotrajni podnosivi napon industrijske frekvencije $U_{n,p,f}$ kV	Rizici preskoka na nadzemnim vodovima 110 kV ($R_{U,v}$, $R_{U,s}$ - rizici preskoka na vodu sa suvom i vlažnom izolacijom pri uključenju u neopterećenom stanju; $R_{1APU,v}$, $R_{3APU,v}$ - rizici preskoka na vodu sa vlažnom izolacijom pri 1APU i 3APU; $R_{1APU,s}$, $R_{3APU,s}$ - rizici preskoka na vodu sa suvom izolacijom pri 1APU i 3APU)					
			$R_{U,v}$	$R_{U,s}$	$R_{1APU,v}$	$R_{1APU,s}$	$R_{3APU,v}$	$R_{3APU,s}$
13.	Beograd 3 - Beograd 1 (16 km)	185 230	$3.2 \cdot 10^{-3}$ $9.2 \cdot 10^{-7}$	$7.7 \cdot 10^{-5}$ $1.3 \cdot 10^{-8}$	$1.6 \cdot 10^{-3}$ $4.9 \cdot 10^{-7}$	$1.4 \cdot 10^{-3}$ $3.6 \cdot 10^{-7}$	$4.8 \cdot 10^{-2}$ $3.4 \cdot 10^{-5}$	$2.3 \cdot 10^{-1}$ $1.8 \cdot 10^{-3}$
14.	Beograd 3 - Beograd 18 (30 km)	185 230	$1.1 \cdot 10^{-2}$ $3.5 \cdot 10^{-6}$	$2.8 \cdot 10^{-4}$ $5 \cdot 10^{-8}$	$7.3 \cdot 10^{-3}$ $2.6 \cdot 10^{-6}$	$2.4 \cdot 10^{-2}$ $1.1 \cdot 10^{-5}$	$7.9 \cdot 10^{-2}$ $8.1 \cdot 10^{-5}$	$2.3 \cdot 10^{-1}$ $3.4 \cdot 10^{-3}$
15.	Beograd 3 - Pančevo 1 (25 km)	185 230	$8.9 \cdot 10^{-3}$ $2.8 \cdot 10^{-6}$	$2.3 \cdot 10^{-4}$ $4 \cdot 10^{-8}$	$2.6 \cdot 10^{-3}$ $7.5 \cdot 10^{-7}$	$3.6 \cdot 10^{-3}$ $9.9 \cdot 10^{-7}$	$5.8 \cdot 10^{-2}$ $4.1 \cdot 10^{-5}$	$2.1 \cdot 10^{-1}$ $1.7 \cdot 10^{-3}$

Tabela 11.2.2.2.3.3. Očekivani godišnji brojevi preskoka (N_p), ispada (N_i) i kvarova (N_{ot}) i prosečni intervali vremena između dva uzastopna preskoka (T_p), ispada (T_i) i kvara (T_{ot}) pri sklopnim operacijama na istraživanim nadzemnim vodovima 110 kV sa izolacijom različitih standardizovanih nazivnih kratkotrajnih podnosivih napona industrijske frekvencije ($U_{n,p,f}$)

Redni broj	Nadzemni vod	$U_{n,p,f}$ (kV _{gr})	N_p	T_p (god.)	N_i	T_i (god.)	N_{ot}	T_{ot} (god.)
1.	Niš 2 - Leskovac 4 (48 km)	185 230	0.24 <0.001	4.2 >1000	0.128 <0.001	7.8 >1000	0.0128 <0.0001	78 >10000
2.	Niš 2 - Pirot 2 (62 km)	185 230	0.64 0.028	1.6 36	0.39 0.027	2.6 37	0.039 0.0027	26 370
3.	Niš 2 - Niš 3 (6.3 km)	185 230	0.0022 <0.001	455 >1000	<0.001 <0.001	>1000 >1000	<0.0001 <0.0001	>10000 >10000
4.	Niš 2 - Niš 1 (14.5 km)	185 230	0.017 <0.001	59 >1000	0.008 <0.001	125 >1000	0.0008 <0.0001	1250 >10000
5.	Bor 2 - Majdanpek 2 (44 km)	185 230	0.146 <0.001	6.8 >1000	0.091 <0.001	11 >1000	0.0091 <0.0001	110 >10000
6.	Bor 2 - Zaječar 2 (20 km)	185 230	0.011 <0.001	91 >1000	0.008 <0.001	125 >1000	0.0008 <0.0001	1250 >10000
7.	Bor 2 - Veliki Krivelj (8.8 km)	185 230	0.008 <0.001	125 >1000	0.004 <0.001	250 >1000	0.0004 <0.0001	2500 >10000
8.	Požega - Sevojno (15 km)	185 230	0.008 <0.001	125 >1000	0.007 <0.001	143 >1000	0.0007 <0.0001	1428 >10000
9.	Požega - Beljina (54 km)	185 230	0.4 0.02	2.5 50	0.27 0.02	3.7 50	0.027 0.002	37 500
10.	Požega - Guča (16 km)	185 230	<0.001 <0.001	>1000 >1000	<0.001 <0.001	>1000 >1000	<0.0001 <0.0001	>10000 >10000
11.	Požega - Ivanjica (29 km)	185 230	0.033 <0.001	30 >1000	0.029 <0.001	34 >1000	0.0029 <0.0001	345 >10000
12.	Beograd 3 - Smederevo 2 (42 km)	185 230	0.384 <0.001	2.6 >1000	0.167 <0.001	6 >1000	0.0167 <0.0001	60 >10000
13.	Beograd 3 - Beograd 1 (16 km)	185 230	0.068 <0.001	14.7 >1000	0.043 <0.001	23 >1000	0.0043 <0.0001	233 >10000
14.	Beograd 3 - Beograd 18 (30 km)	185 230	0.216 <0.001	4.6 >1000	0.127 <0.001	7.9 >1000	0.0127 <0.0001	79 >10000
15.	Beograd 3 - Pančevo 1 (25 km)	185 230	0.144 <0.001	6.9 >1000	0.073 <0.001	13.7 >1000	0.0073 <0.0001	137 >10000

11.2.3. Koordinacija izolacije transformatorskih stanica 400 kV/220 kV, 400 kV/110 kV i 220 kV/110 kV u oblasti sklopnih prenapona

11.2.3.1. Parametri pouzdanosti izolacije TS 400 kV/220 kV i TS 220 kV/110 kV za eksperimentima utvrđene sklopne prenapone

Institut "Nikola Tesla" je izvršio obimna eksperimentalna istraživanja prenapona u TS u različitim konfiguracijama pri sklopnim operacijama prekidača 400 kV, 220 kV i 110 kV i to:

- pri uključenju i isključenju neopterećenih nadzemnih vodova,
- pri uključenju i isključenju nadzemnih vodova opterećenih transformatorom ili autotransformatorom sa i bez reaktora na tercijeru,
- pri uključenju i isključenju transformatora ili autotransformatora sa i bez reaktora na tercijeru,
- pri nastanku i isključenju zemljospoja na vodu i pri IAPU.

Razmatranje je izvršeno posebno za spoljašnju izolaciju 400 kV, 220 kV i 110 kV dela TS i posebno za izolaciju namotaja energetskih transformatora 400 kV/220 kV, 400 kV/110 kV i 220 kV/110 kV.

11.2.3.1.1. Parametri pouzdanosti izolacije 400 kV dela TS 400 kV/220 kV i TS 400 kV/110 kV za eksperimentima utvrđene sklopne prenapone

Eksperimentalna istraživanja prenapona pri sklopnim operacijama prekidača 400 kV su izvršena u deset TS 400 kV/220 kV i TS 400 kV/110 kV i razvodnih postrojenja 400 kV (26,36,47,54). Prekidači sa kojima su vršene operacije uključenja i isključenja su malouljni, SF₆ i pneumatski. U svim razmatranim konfiguracijama izvršeno je najmanje po 10 ciklusa operacija uključenje-isključenje, osim u konfiguracijama u kojima je izvedeno IAPU. Prelazni naponi su snimani na početku voda u TS i na priključcima transformatora, odnosno autotransformatora.

Pri uključenju u istraživanim konfiguracijama javljaju se uticajni fazni prenaponi na spoljašnjoj izolaciji. Najviši prenaponi (najuticajniji) se javljaju pri uključenju neopterećenih nadzemnih vodova i to na njihovom kraju; najviši izmereni fazni prenapon je $k_f=2.28$. Najviši izmereni fazni prenapon pri uključenju voda opterećenog neopterećenim transformatorom, odnosno autotransformatorom sa i bez reaktora na tercijeru je $k_f=2.10$, a pri uključenju neopterećenih transformatora, odnosno, autotransformatora sa i bez reaktora na tercijeru je $k_f=1.80$. Ukoliko je mreža slabija (najslabija mreža je bila u toku istraživanja na elektroprenosu 400 kV Đerdap-Beograd) prenaponi su viši.

Isključenja prekidača u istraživanim konfiguracijama su vršena obično posle pauze od najmanje tri minute nakon uključenja, dakle, u stacionarnom stanju. Pri takvim isključenjima neopterećenih nadzemnih vodova i neopterećenih transformatora odnosno autotransformatora, javljaju se niski prenaponi ili ih u najvećem broju slučajeva nema. Međutim, pri isključenjima voda opterećenih transformatorom, odnosno autotransformatorom sa i bez reaktora na tercijeru, mogu se pojaviti uticajni prenaponi i oni su obično uticajniji ukoliko je mreža slabija; najviši izmereni fazni prenapon je $k_f=1.68$. Pri isključenju autotransformatora sa reaktorom na tercijeru javljaju se uticajni prenaponi; najviši izmereni fazni prenapon je $k_f=2.10$.

Koristeći podatke o izmerenim vrednostima faznih prenapona u istraživanim konfiguracijama u 400 kV delu TS i razvodnim postrojenjima 400 kV, izračunati su za podnosive sklopne udarne fazne napone 1050 kV, 950 kV i 850 kV rizici preskoka ($R_{p,TS}$), očekivani godišnji brojevi preskoka ($N_{p,TS}$) i prosečni intervali vremena ($T_{p,TS}$) između dva uzastopna preskoka iz izraza:

$$R_{p,TS} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left\{ 1 - \left[(1 - P_{0,i})(1 - P_{4,i})(1 - P_{8,i}) \right]^n \right\} \quad (11.2.3.1.1.1.)$$

$$N_{p,TS} = R_{p,TS} N_g \quad (11.2.3.1.1.2.)$$

$$T_{p,TS} = \frac{1}{N_{p,TS}} \quad (11.2.3.1.1.3.)$$

Ovde su:

N - broj izvedenih operacija (uključenja ili isključenja) prekidača u razmatranoj konfiguraciji,

n - broj konstrukcija spoljašnje izolacije po fazi u TS u razmatranoj konfiguraciji,

$P_{0,i}$, $P_{4,i}$, $P_{8,i}$ - verovatnoća preskoka pri pojavi prenapona na konstrukciji spoljašnje izolacije faza 0,4 i 8 u TS pri i -toj operaciji prekidača,

N_g - broj očekivanih operacija prekidača godišnje u razmatranoj konfiguraciji (usvojeno $N_g=10$).

Verovatnoće preskoka $P_{0,i}$, $P_{4,i}$, $P_{8,i}$ su izračunate iz izraza:

$$P_i = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_0^{u_i} e^{-\frac{(u-u_{50})^2}{2\sigma^2}} du \quad (11.2.3.1.1.4.)$$

u_{50}, σ - parametri krivih efekta fazne izolacije za mrežu 400 kV dati u tabeli 11.2.1.1. (uzeti su parametri krivih efekta za suhu izolaciju),

u_i - prenapon na konstrukciji spoljašnje izolacije u TS pri i -toj operaciji prekidača.

Pretpostavljeno je da su sve konstrukcije spoljašnje izolacije u konfiguraciji po fazi izložene istom prenaponu pri i -toj operaciji prekidača. Usvojeno je da polja nadzemnih vodova i transformatora imaju 10 konstrukcija spoljašnje izolacije po fazi i da 400 kV deo TS ima 100 izolacija po fazi.

Iz razmatranja su isključene operacije uključenja nadzemnih vodova opterećenih transformatorom ili autotransformatorom, pošto se iste ne izvode ili se izvode u izuzetnim slučajevima. Iste dovode i do uticajnih prenapona koji naprežu veliki broj jediničnih izolacija u 400 kV delu TS, pa su i stoga nepoželjne. Konstatovano je da su rizici preskoka u 400 kV delu TS i razvodnim postrojenjima 400 kV veoma mali za spoljašnju izolaciju podnosivih sklopnih udarnih napona 1050 kV_{IV}. Prosečni intervali vremena između dva uzastopna preskoka spoljašnje izolacije u istraživanim konfiguracijama u 400 kV delu TS i razvodnim postrojenjima 400 kV su najčešće znatno iznad nekoliko hiljada godina. Takođe je konstatovano da su rizici preskoka mali i za spoljašnju izolaciju podnosivih sklopnih udarnih napona 950 kV_{IV}. Prosečni intervali vremena između dva uzastopna preskoka spoljašnje izolacije u istraživanim konfiguracijama su najčešće veći od nekoliko stotina godina. U 400 kV delu TS i razvodnim postrojenjima 400 kV sa spoljašnjom izolacijom podnosivih sklopnih udarnih napona 850 kV_{IV} javljaju se u određenim konfiguracijama nešto veći rizici preskoka spoljašnje izolacije; prosečni intervali vremena između dva uzastopna preskoka su i u kritičnim konfiguracijama iznad 30 god. Istraživanja prenapona u 400 kV delu TS su izvršena kada su u njima bili postojeći odvodnici prenapona koji zbog visokog napona reagovanja (900 kV) nisu ni mogli da ograničavaju prenapone koji su se pojavljivali. Ukoliko se ide na sniženje izolacionog nivoa u TS zaštitne karakteristike postojećih odvodnika ne zadovoljavaju i isti se moraju zameniti odgovarajućim. Sa novim odvodnicima prenapona smanjio bi se još više rizik preskoka spoljašnje izolacije u TS.

11.2.3.1.2. Parametri pouzdanosti izolacije 220 kV dela TS 400 kV/220 kV i TS 220 kV/110 kV za eksperimentima utvrđene sklopne prenapone

Eksperimentalna istraživanja prenapona pri sklopnim operacijama prekidača 220 kV su izvršena u različitim konfiguracijama u dve TS 400 kV/220 kV i jednoj TS 220 kV/110 kV [46,50,54]. Prekidači sa kojima su vršene operacije uključenja i isključenja su malouljni. U razmatranim konfiguracijama izvršeno je više ciklusa operacija uključenje-isključenje, osim u konfiguraciji u kojoj je izvedeno IAPU. Prelazni fazni naponi su snimani na početku voda u TS i na priključcima transformatora, odnosno autotransformatora.

Uticajni skupovi prenapona javljaju se pri uključenju, a u nekim konfiguracijama i pri isključenju neopterećenih nadzemnih vodova, zatim pri uključenju i isključenju autotransformatora opterećenog nadzemnim vodom i pri uključenju neopterećenih transformatora i autotransformatora. Konstatacije o procesima pri uključenju i isključenju i visinama prenapona date za nadzemne vodove 220 kV u delu 11.2.2.2. važe i za 220 kV deo TS. Najviši izmereni fazni prenapon pri uključenju i isključenju transformatora, odnosno autotransformatora je $k_f=1.58$.

Koristeći podatke o izmerenim vrednostima faznih prenapona u istraživanim konfiguracijama na spoljašnjoj izolaciji u TS 220 kV, izračunati su iz izraza (11.2.3.1.1.1.), (11.2.3.1.1.2.) i (11.2.3.1.1.3.) rizici preskoka, očekivani godišnji brojevi preskoka i prosečni intervali vremena između dva uzastopna preskoka za usvojene krive efekta fazne izolacije za sklopne prenapone. Parametri krivih efekta u_{50} i σ su dati u tabeli 11.2.1.1. Konstatovano je da su rizici preskoka spoljašnje izolacije u 220 kV delu TS veoma mali za kratkotrajne podnosive napone industrijske frekvencije 460 kV_{eff}, 395 kV_{eff} i 360 kV_{eff}. Vremenski interval između dva uzastopna preskoka je najmanje nekoliko stotina godina za izolaciju kratkotrajnog podnosivog napona industrijske frekvencije 360 kV_{eff}, a znatno veći je za napone 460 kV_{eff} i 395 kV_{eff}. Za izolaciju napona 325 kV_{eff} i 275 kV_{eff}, rizici preskoka u 220 kV delu TS u nekim konfiguracijama su nešto veći. Vremenski interval između dva uzastopna preskoka je najmanje nekoliko desetina godina. Istraživanja prenapona su izvršena sa postojećim odvodnicima prenapona u 220 kV delu TS koji nisu dolazili u situaciju da ograničavaju sklopne prenapone zbog visokih napona reagovanja. Ukoliko se ide na sniženje izolacionog nivoa, zaštitne karakteristike postojećih odvodnika prenapona ne zadovoljavaju i isti se moraju zameniti. Sa novim odvodnicima prenapona u određenim konfiguracijama smanjio bi se rizik preskoka u 220 kV delu TS. U slučajevima kada se javljaju višestruka ponovna paljenja električnog luka pri isključenju prekidača rizik preskoka spoljašnje izolacije je znatan. Prekidače, kod kojih se to javlja (stariji tipovi malouljnih prekidača), poželjno je zameniti i njihovo sadašnje korišćenje, ako je moguće, svesti na nužni minimum.

11.2.3.1.3. Parametri pouzdanosti izolacije 110 kV dela TS 400 kV/110 kV i TS 220 kV/110 kV za eksperimentima utvrđene sklopne prenapone

Eksperimentalna istraživanja prenapona pri sklopnim operacijama prekidača 110 kV su izvršena u različitim konfiguracijama u dve TS 400 kV/110 kV i tri TS 220 kV/110 kV (46,50,54). Prekidači sa kojima su vršene operacije uključenja i isključenja su malouljni, pneumatski i SF₆. U razmatranim konfiguracijama izvršeno je više ciklusa operacija uključenje-isključenje osim u konfiguraciji u kojoj je izvedeno 1APU. Prelazni fazni naponi su snimani na početku voda u 110 kV delu TS i na priključcima transformatora, odnosno autotransformatora.

Uticajni prenaponi se javljaju pri uključenju i isključenju neopterećenih nadzemnih vodova i pri uključenju transformatora, odnosno autotransformatora.

Konstatacije o procesima pri uključenju i isključenju i visinama prenapona date za nadzemne vodove 110 kV u delu 11.2.2.1.3 važe i za 110 kV deo TS. Najviši izmereni fazni prenapon pri uključenju i isključenju transformatora, odnosno autotransformatora je $k_f=1.60$.

Pri nastanku i isključenju zemljospoja (izvedena su dva zemljospoja) i pri 1APU nije bilo visokih prenapona.

Koristeći podatke o izmerenim vrednostima faznih prenapona u istraživanim konfiguracijama na spoljašnjoj izolaciji u 110 kV delu TS, izračunati su iz izraza (11.2.3.1.1.1.), (11.2.3.1.1.2.) i (11.2.3.1.1.3.) rizici preskoka, očekivani godišnji brojevi preskoka i prosečni intervali vremena između dva uzastopna preskoka za usvojene krive efekta za sklopne prenapone. Parametri krivih efekta u_{50} i σ su dati u tabeli 11.2.1.1. Konstatovano je da su rizici preskoka spoljašnje izolacije u 110 kV delu TS mali za kratkotrajni podnosivi napon industrijske frekvencije 230 kV_{eff}, osim za operacije isključenja kada dolazi do pojave višestrukih ponovnih paljenja luka ili do izrazitog

rezanja struje u prekidaču. Vremenski interval između dva uzastopna preskoka spoljašnje izolacije u 110 kV delu TS je najmanje nekoliko stotina godina. Za izolaciju napona 185 kV_{eff} rizici preskoka u 110 kV delu TS u nekim konfiguracijama mogu da budu znatni. Sva razmatranja su izvršena sa postojećim odvodnicima prenapona u 110 kV delu TS koji nisu dolazili u situaciju da ograničavaju prenapone zbog visokih napona reagovanja. Ukoliko se ide na sniženje izolacionog nivoa, zaštitne karakteristike postojećih odvodnika prenapona ne zadovoljavaju i isti se moraju zameniti. Sa novim odvodnicima prenapona u određenim konfiguracijama smanjio bi se rizik preskoka u 110 kV delu TS na spoljašnjoj izolaciji kratkotrajnog podnosivog napona industrijske frekvencije 185 kV_{eff}. U slučajevima kada se u postojećoj mreži 110 kV javljaju višestruka ponovna paljenja električnog luka ili izrazita rezanja struje u prekidaču pri njegovom isključenju, rizik preskoka i proboja izolacije je znatan. Prekidače, kod kojih se to javlja, poželjno je zameniti, da bi se smanjio rizik preskoka ili proboja izolacije.

11.2.3.1.4. Parametri pouzdanosti izolacije energetskih transformatora 400 kV/220 kV, 400 kV/110 kV i 220 kV/110 kV za eksperimentima utvrđene sklopne prenapone

Pouzdanost rada energetskih transformatora, kao ključnih elemenata u TS, pri dejstvu sklopnih prenapona je posebno razmatrana. Operacijama prekidača 400 kV, 220 kV i 110 kV u TS mogu da se pojave znatni prenaponi na izolaciji namotaja transformatora 400 kV/220 kV, 400 kV/110 kV i 220 kV/110 kV. To su pokazala i eksperimentalna istraživanja prenapona u TS [28, 54]. Najuticajni prenaponi se javljaju pri uključenju energetskih transformatora i pri isključenju transformatora opterećenih reaktorom na tercijeru. Najviši izmereni fazni prenaponi na izolaciji namotaja transformatora, odnosno autotransformatora su: $k_f=2.10$ na 400 kV, $k_f=1.60$ na 220 kV i $k_f=1.90$ na 110 kV.

Koristeći podatke o izmerenim vrednostima faznih prenapona na izolaciji namotaja transformatora 400 kV/220 kV, 400 kV/110 kV i 220 kV/110 kV u istraživanim konfiguracijama, izračunati su rizici proboja (R_T), očekivani godišnji brojevi proboja (N_T) i prosečni intervali vremena (T_T) između dva uzastopna proboja izolacije namotaja transformatora iz sledećih izraza:

$$R_T = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left[1 - (1 - P_{V,0,i})(1 - P_{V,4,i})(1 - P_{V,8,i})(1 - P_{N,0,i})(1 - P_{N,4,i})(1 - P_{N,8,i}) \right] \quad (11.2.3.1.4.1.)$$

$$N_T = R_T N_g \quad (11.2.3.1.4.2.)$$

$$T_T = \frac{1}{N_T} \quad (11.2.3.1.4.3.)$$

Ovde su:

$P_{V,0,i}$, $P_{V,4,i}$, $P_{V,8,i}$ - verovatnoće proboja faza 0, 4 i 8 namotaja višeg napona transformatora pri i-toj operaciji prekidača,

$P_{N,0,i}$, $P_{N,4,i}$, $P_{N,8,i}$ - verovatnoće proboja faza 0, 4 i 8 namotaja nižeg napona transformatora pri i-toj operaciji prekidača,

N - broj primenjenih operacija prekidača u razmatranoj konfiguraciji,

N_g - broj operacija prekidača godišnje u razmatranoj konfiguraciji (usvojeno $N_g=10$).

Verovatnoće proboja izolacije namotaja transformatora: $P_{V,0,i}$, $P_{V,4,i}$, $P_{V,8,i}$, $P_{N,0,i}$, $P_{N,4,i}$ i $P_{N,8,i}$ su određene iz sledećeg izraza:

$$P = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_0^{u_i} e^{-\frac{(u-u_0)^2}{2\sigma^2}} du \quad (11.2.3.1.4.4.)$$

Ovde su:

u_i - prenapon na izolaciji posmatranog faznog namotaja transformatora pri i-toj operaciji prekidača u posmatranoj konfiguraciji,

u_{50} - 50%-ni probojni napon fazne izolacije namotaja transformatora razmatranog podnosivog sklopnog udarnog faznog napona, odnosno kratkotrajnog podnosivog napona industrijske frekvencije,

σ - standardno odstupanje napona u_{50} ($\sigma=8\%$).

u_{50} i σ za fazne izolacije namotaja transformatora su dati u tabeli 11.2.1.1.

Kontatovano je da su prosečni intervali vremena između dva uzastopna proboja izolacije namotaja transformatora 400 kV/220 kV, 400 kV/110 kV i 220 kV/110 kV znatni i u kritičnim konfiguracijama. Njihove vrednosti su date u tabeli 11.2.3.1.4.1. Kao kritične konfiguracije su uzete one u kojima se javljaju najviši sklopni prenaponi na izolaciji namotaja transformatora.

Tabela 11.2.3.1.4.1.

Prosečni intervali vremena ($T_{p,TS}$) između dva uzastopna proboja fazne izolacije namotaja transformatora 400 kV/220 kV, 400 kV/110 kV i 220 kV/110 kV pri sklopnim prenaponima u kritičnim konfiguracijama.

Transformator	Podnosivi naponi fazne izolacije višeg i nižeg napona namotaja transformatora	Prosečni intervali vremena između dva uzastopna proboja izolacije namotaja transformatora $T_{p,TS}$ (god.)
400 kV/220 kV	1050 kV _{tv} /460 kV _{eff}	>10.000
	1050 kV _{tv} /395 kV _{eff}	>10.000
	950 kV _{tv} /360 kV _{eff}	>10.000
	850 kV _{tv} /325 kV _{eff}	>10.000
	850 kV _{tv} /275 kV _{eff}	>10.000
400 kV/110 kV	1050 kV _{tv} /230 kV _{eff}	>10.000
	950 kV _{tv} /230 kV _{eff}	>10.000
	850 kV _{tv} /185 kV _{eff}	>500
220 kV/110 kV	460 kV _{eff} /230 kV _{eff}	>10.000
	395 kV _{eff} /230 kV _{eff}	>10.000
	360 kV _{eff} /185 kV _{eff}	>10.000
	325 kV _{eff} /185 kV _{eff}	>10.000
	275 kV _{eff} /185 kV _{eff}	>10.000

U istraživanim konfiguracijama na priključcima transformatora su bili prisutni postojeći odvodnici prenapona. Oni imaju visoke napone reagovanja i nisu mogli da ograničavaju prenapone koji su se pojavljivali na izolaciji namotaja transformatora. Snižanjem izolacionog nivoa postojeći odvodnici se moraju zameniti, jer njihove zaštitne karakteristike ne odgovaraju. Sa novim odvodnicima prenapona smanjili bi se još više rizici proboja izolacije namotaja transformatora, a kod nižih podnosivih napona došlo bi do osetnog povećanja intervala vremena između dva proboja.

11.2.3.2. Parametri pouzdanosti izolacije TS 400 kV/220 kV, TS 400 kV/110 kV i TS 220 kV/110 kV za proračunima utvrđene sklopne prenapone

Uticajni skupovi sklopnih prenapona koji naprežu izolacije transformatorskih stanica su:

- skupovi prenapona pri uključenju neopterećenih nadzemnih vodova,
- skupovi prenapona pri 1APU nadzemnih vodova,
- skupovi prenapona pri 3APU nadzemnih vodova,
- skupovi prenapona pri uključenju neopterećenih transformatora sa strane višeg naponskog nivoa.

Isti su razmatrani u konkretnim TS.

Nisu razmatrani skupovi prenapona pri isključenju nadzemnih vodova i transformatora, jer oni zavise prvenstveno od karakteristika prekidača. Izborom kvalitetnih savremenih prekidača prenaponi pri isključenju se svode na neuticajne.

Razmatranje je izvršeno posebno za spoljašnju izolaciju TS i posebno za izolaciju namotaja transformatora.

Takođe, razmatranje je izvršeno sa i bez prenaponske zaštite transformatora. Nju čine odvodnici prenapona sa ili bez iskrišta domaćeg proizvođača. Zaštitne karakteristike odvodnika prenapona korišćene u proračunu date su u tabeli 11.2.3.2.1.

Pretpostavljeno je da su prenaponi na izolacionim konstrukcijama na početku voda, pri njegovom uključenju u neopterećenom stanju, 1APU i 3APU prekidačima u TS, koji se javljaju na svim izolacionim konstrukcijama TS istog naponskog nivoa, kao i na drugim naponskim nivoima, takođe na svim izolacionim konstrukcijama, jednaki naponima na odgovarajućim priključcima autotransformatora. Dalje, pretpostavljeno je da je broj izolacionih konstrukcija po fazi na svakom od naponskih nivoa $n_f=100$ i da je broj izolacija između dve faze (kao izolacije između faza usvojena su vazдушna rastojanja na rasponu između dve susedne fazne izolacione konstrukcije), takođe $n_{mf}=100$.

Preskok u TS može predstavljati istovremeno i ispad celokupne TS iz pogona, ali se češće svodi na ispad vodova i autotransformatora sa sabirnica jednog od naponskih nivoa u TS. Izuzetak su preskoci koji nastaju na izolacionim konstrukcijama u TS u polju nadzemnih vodova počevši od strujnog transformatora voda prema izlasku voda iz TS, jer su to preskoci koji pripadaju vodu. Naime preskoci na tim izolacionim konstrukcijama, iako se nalaze u TS, ne dovode do ispada TS. Vod ispada, ali se najčešće dejstvom 1APU i 3APU, ako nema oštećenja izolacije, ponovo vraća u pogon.

Rizik preskoka na spoljašnjoj faznoj izolaciji TS ($R_{V,TS}$) pri uključenju jednog od neopterećenih vodova, odnosno 1APU, ili 3APU, prekidačem u TS je određen iz sledećeg izraza:

$$R_{V,TS} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left\{ 1 - \left[(1 - P_{VN,0,i})(1 - P_{VN,4,i})(1 - P_{VN,8,i}) \right]^{n_f \cdot n_N} \left[(1 - P_{VN,0-4,i})(1 - P_{VN,4-8,i})(1 - P_{VN,8-0,i}) \right]^{n_{mf} \cdot n_N} \right. \\ \left. \cdot \left[(1 - P_{NV,0,i})(1 - P_{NV,4,i})(1 - P_{NV,8,i}) \right]^{n_f \cdot n_N} \left[(1 - P_{NV,0-4,i})(1 - P_{NV,4-8,i})(1 - P_{NV,8-0,i}) \right]^{n_{mf} \cdot n_N} \right\}$$

(11.2.3.2.1.)

Ovde su:

$P_{VN,0,i}$, $P_{VN,4,i}$, $P_{VN,8,i}$ - verovatnoće preskoka na izolacionim konstrukcijama faza 0,4 i 8 višenaponskog nivoa pri delovanju prenapona na njima u toku i-te operacije uključenja prekidača u TS,

Tabela 11.2.3.2.1. Zaštitne karakteristike odvodnika sa (SiC) i bez (ZnO) iskrišta korišćene u proračunu

Naponski nivo	Odvodnik	Naznačeni napon kV_{eff}	U-I karakteristika odvodnika prenapona									Maksimalni sklopni napon reagovanja kV_{iv}
			I(kA)	0	5	10	20					
400 kV	SiC	336	I(kA)	0	5	10	20					807
			U(kV)	639	706	773	874					
	ZnO	312	I(kA)	0	$2 \cdot 10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$2.5 \cdot 10^{-5}$	0.25	1	3	807
			U(kV)	0	440	480	503	521	596	630	650	
220 kV	SiC	204	I(kA)	0	5	10	20					490
			U(kV)	387	428	469	530					
	ZnO	186	I(kA)	0	$2 \cdot 10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$2.5 \cdot 10^{-5}$	0.25	1	3	490
			U(kV)	0	262	287	300	311	356	376	388	
110 kV	SiC	108	I(kA)	0	5	10	20					259
			U(kV)	206	227	248	281					
	ZnO	102	I(kA)	0	$2 \cdot 10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$2.5 \cdot 10^{-5}$	0.25	1	3	259
			U(kV)	0	146	160	167	173	198	209	216	

$P_{NN,0,i}$, $P_{NN,4,i}$, $P_{NN,8,i}$ - verovatnoće preskoka na izolacionim konstrukcijama faza 0,4 i 8 niženaponskog nivoa TS pri delovanju prenapona na njima u toku i-te operacije uključena prekidača u TS,

$P_{VN,0-4,i}$, $P_{VN,4-8,i}$, $P_{VN,8-0,i}$ - verovatnoće preskoka na izolaciji između faza 0-4, 4-8, 8-0 višenaponskog nivoa TS pri delovanju prenapona na njima u toku i-te operacije uključena prekidača u TS,

$P_{NN,0-4,i}$, $P_{NN,4-8,i}$, $P_{NN,8-0,i}$ - verovatnoće preskoka na izolaciji između faza 0-4, 4-8, 8-0 niženaponskog nivoa TS pri delovanju prenapona na njima u toku i-te operacije uključena prekidača u TS,

$n_{mf,VN}$, $n_{mf,NN}$ - broj izolacija između dve faze u TS na višenaponskom i niženaponskom nivou ($n_{mf,VN} = n_{mf,NN} = 100$).

$n_{f,VN}$, $n_{f,NN}$ - broj izolacionih konstrukcija po fazi na višenaponskom i niženaponskom nivou TS ($n_{f,VN} = n_{f,NN} = 100$).

N - broj uključena neopterećenog voda, odnosno broj 1APU, odnosno broj 3APU ($N=200$) prekidača u TS,

Rizici preskoka su izračunati za vlažnu i suhu izolaciju. Verovatnoće preskoka koje figurišu u izrazu (11.2.3.2.1.) su određene iz izraza (11.2.3.1.1.4.) koristeći parametre krivih efekata za suhu i vlažnu izolaciju.

Godišnji broj uključena neopterećenih vodova prekidačima u TS je $N_U=10$ po vodu, a broj 1APU (N_{1APU}) i 3APU (N_{3APU}) na 100 km vodova godišnje je prepolovljen u odnosu na usvojene N_{1APU} i N_{3APU} nadzemnih vodova 400 kV, 220 kV i 110 kV izložene u delu 11.2.2. Pretpostavljeno je da pri APU u 50% slučajeva prvo uključuje prekidač voda u razmatranoj TS, a u 50% slučajeva prvo uključuje prekidač istog voda u susednoj TS. Uključenje drugog prekidača voda ne dovodi do pojave uticajnog skupa prenapona.

Očekivani godišnji brojevi preskoka ($N_{p,V,TS}$), ispada ($N_{i,V,TS}$) i oštećenja ($N_{ot,V,TS}$) spoljašnje izolacije, kao i prosečni intervali vremena između dva uzastopna preskoka ($T_{p,V,TS}$), ispada ($T_{i,V,TS}$) i oštećenja ($T_{ot,V,TS}$) u TS usled sklopnih operacija prekidača u poljima nadzemnih vodova u TS, su određeni iz izraza:

$$N_{p,V,TS} = N_{i,V,TS} = \sum_{j=1}^b \left[N_{U,j} (0.8R_{U,v,j} + 0.2R_{U,s,j}) + 0.5 \cdot N_{1APU,j} I_j (0.8R_{1APU,v,j} + 0.2R_{1APU,s,j}) + 0.5 \cdot N_{3APU,j} I_j (0.8R_{3APU,v,j} + 0.2R_{3APU,s,j}) \right] \quad (11.2.3.2.2)$$

$$N_{ot,V,TS} = 0.1N_{i,V,TS} \quad (11.2.3.2.3.)$$

$$T_{p,V,TS} = T_{i,V,TS} = \frac{1}{N_{i,V,TS}} \quad (11.2.3.2.4.)$$

$$T_{ot,V,TS} = \frac{1}{N_{ot,V,TS}} \quad (11.2.3.2.5.)$$

Ovde su:

$R_{U,v,j}$, $R_{U,s,j}$ - rizici preskoka u TS sa suvom i vlažnom izolacijom pri uključanju j -tog neopterećenog voda,

$R_{1APU,v,j}$, $R_{3APU,v,j}$ - rizici preskoka u TS sa vlažnom izolacijom pri 1APU i 3APU j -tog voda,

$R_{1APU,s,j}$, $R_{3APU,s,j}$ - rizici preskoka u TS sa suvom izolacijom pri 1APU i 3APU j -tog voda,

$N_{U,j}$ - godišnji broj uključanja neopterećenog j -tog voda,

$N_{1APU,j}$ - godišnji broj 1APU j -tog voda u razmatranoj TS,

$N_{3APU,j}$ - godišnji broj 3APU j -tog voda u razmatranoj TS,

l_j - dužina j -tog voda izražena u jediničnim vrednostima od 100 km,

b - broj nadzemnih vodova u razmatranoj TS.

Preskok na spoljašnjoj izolaciji TS pri sklopnim operacijama prekidača u poljima nadzemnih vodova TS predstavlja ispad TS, te je zato broj preskoka istovremeno i broj ispada ($N_{p,V,TS}=N_{i,V,TS}$).

Pretpostavljeno je da svaki deseti ispad TS dovodi do oštećenja izolacije u TS.

Rizik preskoka na spoljašnjoj faznoj izolaciji ($R_{T,TS}$) u višenaponskom i niženaponskom polju transformatora od prekidača polja ka transformatoru, pri njegovom uključanju prekidačem na višenaponskoj strani, je određen iz sledećeg izraza:

$$R_{T,TS} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left\{ 1 - \left[(1 - P_{VS,0,i})(1 - P_{VS,4,i})(1 - P_{VS,8,i}) \right]^{n_{f,VS,T}} \cdot \left[(1 - P_{VS,0-4,i})(1 - P_{VS,4-8,i})(1 - P_{VS,8-0,i}) \right]^{n_{mf,VS,T}} \cdot \left[(1 - P_{NS,0,i})(1 - P_{NS,4,i})(1 - P_{NS,8,i}) \right]^{n_{f,NS,T}} \left[(1 - P_{NS,0-4,i})(1 - P_{NS,4-8,i})(1 - P_{NS,8-0,i}) \right]^{n_{mf,NS,T}} \right\} \quad (11.2.3.2.6)$$

Ovde su:

$P_{VS,0,i}$, $P_{VS,4,i}$, $P_{VS,8,i}$ - verovatnoće preskoka na izolacionim konstrukcijama faza 0,4 i 8 višenaponskog polja transformatora pri delovanju prenapona u toku i -te operacije uključanja,

$P_{NS,0,i}$, $P_{NS,4,i}$, $P_{NS,8,i}$ - verovatnoće preskoka na izolacionim konstrukcijama faza 0,4 i 8 niženaponskog polja transformatora pri delovanju prenapona u toku i -te operacije uključanja,

$P_{VS,0-4,i}$, $P_{VS,4-8,i}$, $P_{VS,8-0,i}$ - verovatnoće preskoka na izolaciji između faza 0-4, 4-8 i 8-0 višenaponskog polja transformatora pri delovanju prenapona u toku i -te operacije uključanja,

$P_{NS,0-4,i}$, $P_{NS,4-8,i}$, $P_{NS,8-0,i}$ - verovatnoće preskoka na izolaciji između faza 0-4, 4-8 i 8-0 niženaponskog polja transformatora pri delovanju prenapona u toku i -te operacije uključanja,

N - broj uključanja neopterećenog transformatora prekidačem na višenaponskoj strani,

$n_{f,VS,T}$ - broj izolacionih konstrukcija spoljašnje izolacije po fazi višenaponskog polja transformatora izloženih delovanju prenapona u toku i -te operacije uključanja ($n_{f,VS,T}=10$),

$n_{f,NS,T}$ - broj izolacionih konstrukcija spoljašnje izolacije po fazi niženaponskog polja transformatora izloženih delovanju prenapona u toku i -te operacije uključanja ($n_{f,NS,T}=10$),

$n_{mf,VS,T}$ - broj spoljašnjih izolacija između dve faze višenaponskog polja transformatora izloženih delovanju prenapona u toku i -te operacije uključanja ($n_{mf,VS,T}=10$),

$n_{mf,NS,T}$ - broj spoljašnjih izolacija između dve faze niženaponskog polja transformatora izloženih delovanju prenapona u toku i -te operacije uključanja ($n_{mf,NS,T}=10$).

Na spoljašnjoj izolaciji TS, osim izolacije u polju transformatora od strujnog transformatora polja do transformatora, pri uključanju neopterećenog transformatora, javljaju se neuticajni prenaponi.

Očekivani godišnji broj preskoka ($N_{p,T,TS}$) i oštećenja ($N_{ot,T,TS}$), kao i prosečni intervali vremena između dva uzastopna preskoka ($T_{p,T,TS}$) i oštećenja ($T_{ot,T,TS}$) usled preskoka na spoljašnjoj izolaciji u višenaponskom i niženaponskom polju transformatora pri njegovom uključanju prekidačem na višenaponskoj strani, su određeni iz sledećeg izraza:

$$N_{p,T,TS} = N_{U,T} \cdot R_{T,TS} \quad (11.2.3.2.7.)$$

$$N_{ot,T,TS} = 0.1 N_{p,T,TS} \quad (11.2.3.2.8.)$$

$$T_{p,T,TS} = \frac{1}{N_{p,T,TS}} \quad (11.2.3.2.9.)$$

$$T_{ot,T,TS} = \frac{1}{N_{ot,T,TS}} \quad (11.2.3.2.10)$$

Ovde su:

$N_{U,T}$ - broj uključenja neopterećenog transformatora godišnje,

$R_{T,TS}$ - rizik preskoka iz izraza (11.2.3.2.6.).

Usvojeno je da svaki deseti preskok predstavlja oštećenje izolacije i time je sigurno pogoršana slika pouzdanosti rada TS. Pouzdanih statističkih podataka o tome nije bilo.

Preskokom na spoljašnjoj izolaciji višenaponskog i niženaponskog polja transformatora, od strujnog transformatora polja do transformatora ispada samo transformator iz pogona, a ne i TS, te $N_{p,TS}$ predstavlja i broj ispada transformatora.

Preskoci na spoljašnjoj izolaciji u razmatranoj TS, ali ne i ispadi TS, mogu nastati i pri uključenjima iz susednih TS neopterećenih vodova koji se susstiču u razmatranoj TS, kao i pri 1APU i 3APU istih vodova kada prvo uključuje prekidač u susednim TS. Naime, preskoci na spoljašnjoj izolaciji polja nadzemnih vodova do prekidača ne dovode do ispada TS već ispada vod ili, pak, dejstvom 1APU ili 3APU ostaje u pogonu. Rizik preskoka ($R_{VK,TS}$) na ovoj spoljašnjoj izolaciji u jednom od polja nadzemnih vodova je određen pri uključenju neopterećenog voda, odnosno 1APU, odnosno 3APU iz sledećeg izraza:

$$R_{VK,TS} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left\{ 1 - \left[(1 - P_{VK,0,i}) (1 - P_{VK,4,i}) (1 - P_{VK,8,i}) \right]^{n_{f,VK}} \left[(1 - P_{VK,0-4,i}) (1 - P_{VK,4-8,i}) (1 - P_{VK,8-0,i}) \right]^{n_{mf,VK}} \right\} \quad (11.2.3.2.11)$$

Ovde su:

$P_{VK,0,i}$, $P_{VK,4,i}$, $P_{VK,8,i}$ - verovatnoće preskoka u TS na izolacionim konstrukcijama faza 0,4 i 8 polja nadzemnog voda do prekidača pri i -toj operaciji prekidača u susednoj TS,

$P_{VK,0-4,i}$, $P_{VK,4-8,i}$, $P_{VK,8-0,i}$ - verovatnoće preskoka u TS na izolacijama između faza 0-4, 4-8 i 8-0 polja nadzemnog voda do prekidača pri i -toj operaciji prekidača u susednoj TS,

$n_{f,VK}$ - broj izolacionih konstrukcija po fazi u TS u polju nadzemnog voda do prekidača,

$n_{mf,VK}$ - broj izolacija između dve faze u TS u polju nadzemnog voda do prekidača.

Rizici preskoka su izračunati za vlažnu i suhu izolaciju. Verovatnoće preskoka koje figurišu u izrazu (11.2.3.2.11.) su određene iz izraza (11.2.3.1.1.4.) koristeći parametre krivih efekta za suhu i vlažnu izolaciju.

Očekivani godišnji broj preskoka ($N_{p,VK,TS}$) i oštećenja ($N_{ot,VK,TS}$) spoljašnje izolacije polja nadzemnih vodova do prekidača i prosečni intervali vremena između dva uzastopna preskoka ($T_{p,VK,TS}$) i oštećenja ($T_{ot,VK,TS}$) u TS usled sklopnih operacija prekidača u susednim TS su određeni iz sledećih izraza:

$$N_{p,VK,TS} = \sum_{j=1}^b \left[N_{U,j} (0.8R_{U,v,j} + 0.2R_{U,s,j}) + 0.5 \cdot N_{1APU,j} I_j (0.8R_{1APU,v,j} + 0.2R_{1APU,s,j}) + 0.5 \cdot N_{3APU,j} I_j (0.8R_{3APU,v,j} + 0.2R_{3APU,s,j}) \right] \quad (11.2.3.2.12)$$

$$N_{ot,VK,TS} = 0.1 \sum_{j=1}^b \left[0.5 \cdot N_{1APU,j} I_j (0.8R_{1APU,v,j} + 0.2R_{1APU,s,j}) + 0.5 \cdot N_{3APU,j} I_j (0.8R_{3APU,v,j} + 0.2R_{3APU,s,j}) \right] \quad (11.2.3.2.13.)$$

$$T_{p,VK,TS} = \frac{1}{N_{p,VK,TS}} \quad (11.2.3.2.14)$$

$$T_{ot,VK,TS} = \frac{1}{N_{ot,VK,TS}} \quad (11.2.3.2.15.)$$

Ovde su:

$R_{U,v,j}$, $R_{U,s,j}$ - rizici preskoka na vlažnoj i suvoj izolaciji u polju j -tog voda u TS pri njegovom uključenju prekidačem u susjednoj TS,

$R_{IAPU,v,j}$, $R_{3APU,v,j}$ - rizici preskoka na vlažnoj izolaciji u polju j -tog voda u TS pri 1APU i 3APU prekidačem u susjednoj TS,

$R_{IAPU,s,j}$, $R_{3APU,s,j}$ - rizici preskoka na suvoj izolaciji u polju j -tog voda u TS pri 1APU i 3APU prekidačem u susjednoj TS,

$N_{IAPU,j}$, $N_{3APU,j}$ - godišnji broj 1APU i 3APU j -tog voda,

$N_{U,j}$ - godišnji broj uključenja neopterećenog j -tog voda prekidačem u susjednoj TS,

l_j - dužina j -tog voda izražena u jediničnim vrednostima od 100 km,

b - broj nadzemnih vodova u TS.

Ukupni očekivani godišnji broj preskoka ($N_{p,TS}$) i prosečni interval vremena između dva preskoka ($T_{p,TS}$) u TS pri delovanju uticajnih skupova sklopnih prenapona se dobijaju iz sledećih izraza:

$$N_{p,TS} = N_{p,v,TS} + N_{p,t,TS} + N_{p,vk,TS} , \quad (11.2.3.2.16)$$

$$T_{p,TS} = \frac{1}{N_{p,TS}} . \quad (11.2.3.2.17)$$

Ovde su:

$N_{p,v,TS}$ - očekivani godišnji broj preskoka u TS pri sklopnim operacijama prekidača u poljima nadzemnih vodova, definisan izrazom (11.2.3.2.2.),

$N_{p,t,TS}$ - očekivani godišnji broj preskoka pri uključenju neopterećenog transformatora (autotransformatora) prekidačem na visokonaponskoj strani, definisan izrazom (11.2.3.2.7),

$N_{p,vk,TS}$ - očekivani godišnji broj preskoka na spoljašnjoj izolaciji polja nadzemnih vodova u razmatranoj TS usled sklopnih operacija prekidača u susjednim TS, definisan izrazom (11.2.3.2.12.).

U TS 400 kV/220 kV, 400 kV/110 kV i 220 kV/110 kV EPS-a koriste se autotransformatori.

Rizik proboja izolacije bar jednog namotaja autotransformatora pri pojavi sklopnih prenapona na njegovim priključcima u razmatranoj konfiguraciji određen je iz sledećeg izraza:

$$R_T = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left[1 - (1 - P_{V,0,i})(1 - P_{V,4,i})(1 - P_{V,8,i})(1 - P_{N,0,i})(1 - P_{N,4,i})(1 - P_{N,8,i}) \cdot \right. \\ \left. (1 - P_{T,a,i})(1 - P_{T,b,i})(1 - P_{T,c,i}) \right] \quad (11.2.3.2.18)$$

Ovde su:

$P_{V,0,i}$, $P_{V,4,i}$, $P_{V,8,i}$ - verovatnoće proboja izolacije faza 0,4 i 8 namotaja višeg napona autotransformatora pri i -toj operaciji uključenja prekidača,

$P_{N,0,i}$, $P_{N,4,i}$, $P_{N,8,i}$ - verovatnoće proboja izolacije faza 0,4 i 8 namotaja nižeg napona autotransformatora pri i -toj operaciji uključenja prekidača,

$P_{T,a,i}$, $P_{T,b,i}$, $P_{T,c,i}$ - verovatnoće proboja izolacije namotaja a,b i c tercijera autotransformatora pri i -toj operaciji uključenja prekidača,

N - broj uključenja prekidača u razmatranoj konfiguraciji.

Verovatnoće proboja izolacije namotaja autotransformatora $P_{V,0,i}$, $P_{V,4,i}$, $P_{V,8,i}$, $P_{N,0,i}$, $P_{N,4,i}$ i $P_{N,8,i}$ su određene za utvrđene prenapone iz krivih efekta čiji su parametri dati u tabeli 11.2.1.1.

Pošto se ovde ne razmatra koordinacija izolacije mreža ispod 110 kV, pretpostavljeno je da su verovatnoće proboja izolacije namotaja tercijera $P_{T,a}$, $P_{T,b}$ i $P_{T,c}$ autotransformatora jednake nuli pri pojavi sklopnih prenapona na njima usled uključenja prekidača na naponskim nivoima 400 kV, 220 kV i 110 kV. Greške usled ove pretpostavke su zaista male jer su verovatnoće proboja izolacije namotaja tercijera manje od verovatnoće proboja ostalih namotaja autotransformatora.

Očekivani godišnji broj oštećenja ($N_{ot,T}$), odnosno proboja izolacije namotaja autotransformatora i prosečni interval vremena između dva uzastopna oštećenja ($T_{ot,T}$) pri delovanju sklopnih prenapona su određeni iz sledećih izraza:

$$N_{ot,T} = N_{T,U} R_{T,U} + \sum_{j=1}^b (N_{U,j} R_{T,U,j} + N_{1APU,j} I_j R_{T,1APU,j} + N_{3APU,j} \cdot I_j \cdot R_{T,3APU,j}) , \quad (11.2.3.2.19)$$

$$T_{ot,T} = \frac{1}{N_{ot,T}} . \quad (11.2.3.2.20)$$

Ovde su:

$N_{T,U}$ - broj uključenja neopterećenog autotransformatora godišnje prekidačem na višenaponskoj strani ($N_{T,U}=10$),

$N_{U,j}$, $N_{1APU,j}$, $N_{3APU,j}$, I_j , b - podaci objašnjeni uz izraz (11.2.3.2.2.),

$R_{T,U}$ - rizik proboja izolacije namotaja autotransformatora pri njegovom uključenju prekidačem na višenaponskoj strani izračunat iz izraza (11.2.3.2.18),

$R_{T,U,j}$ - rizik proboja izolacije namotaja autotransformatora pri uključenju neopterećenog j -tog voda prekidačem u razmatranoj TS, izračunat iz izraza (11.2.3.2.18.),

$R_{T,1APU,j}$ - rizik proboja izolacije namotaja autotransformatora pri 1APU j -tog voda prekidačem u razmatranoj TS, izračunat iz izraza (11.2.3.2.18.),

$R_{T,3APU,j}$ - rizik proboja izolacije namotaja autotransformatora pri 3APU j -tog voda prekidačem u razmatranoj TS, izračunat iz izraza (11.2.3.2.18).

11.2.3.2.1. Parametri pouzdanosti izolacije TS 400 kV/220 kV/110 kV "Niš 2" u oblasti sklopnih prenapona

Proračun prenapona na izolaciji TS 400 kV/220 kV/110 kV "Niš 2" je izvršen pri 1APU, 3APU i uključenju neopterećenih vodova 400 kV: "Niš 2 - Kosovo B", "Niš 2 - Kragujevac" i "Niš 2 - Bor 2", vodova 220 kV: "Niš 2 - Leskovac 2" i "Niš 2 - Kruševac 1" i vodova 110 kV: "Niš 2 - Leskovac 4", "Niš 2 - Pirot 2", "Niš 2 - Niš 3" i "Niš 2 - Niš 1", kao i pri uključenju neopterećenih autotransformatora 400 kV/220 kV/31.5 kV i 400 kV/110 kV/10 kV prekidačima 400 kV i neopterećenog autotransformatora 220 kV/110 kV/10 kV prekidačem 220 kV.

Najviši izračunati prenaponi na spoljašnjoj izolaciji TS pri operacijama uključenja prekidača u poljima nadzemnih vodova 400 kV, 220 kV i 110 kV nisu prelazili vrednosti $1.6 U_m$ (U_m temena vrednost faznih napona sva tri naponska nivoa u TS "Niš 2").

Pri uključenju autotransformatora 400 kV/220 kV/31.5 kV, 400 kV/110 kV/10 kV i 220 kV/110 kV/10 kV prekidačima na višenaponskoj strani najviši izračunati prenaponi nisu prelazili sledeće vrednosti:

- $1.95 U_m$ kada su autotransformatori bez prenaponske zaštite,
- $1.95 U_m$ kada su autotransformatori zaštićeni postojećim odvodnicima prenapona sa iskrištem,
- $1.8 U_m$ kada su autotransformatori zaštićeni odvodnicima prenapona bez iskrišta.

Prenaponsko stanje na izolaciji namotaja autotransformatora je identično za slučajeve kada su bez prenaponske zaštite i kada su zaštićeni odvodnicima prenapona sa iskrištem. Odvodnici prenapona nisu mogli da reaguju pošto su im naponi reagovanja viši od sklopnih prenapona koji su se pojavljivali na izolaciji namotaja autotransformatora.

Na osnovu utvrđenih prenapona pri sklopnim operacijama prekidača u TS i prekidača nadzemnih vodova u susednim TS, izračunati su iz izraza (11.2.3.2.1., 11.2.3.2.6. i 11.2.3.2.11) rizici preskoka u TS, i iz izraza (11.2.3.2.18.) rizici proboja izolacije namotaja autotransformatora, a na osnovu njih, iz izraza (11.2.3.2.16.), (11.2.3.2.17.), (11.2.3.2.2.), (11.2.3.2.3.), (11.2.3.2.4.), (11.2.3.2.5.) parametri pouzdanosti spoljašnje izolacije TS: očekivani godišnji brojevi preskoka ($N_{p,TS}$), ispada

($N_{i,v,TS}$) i oštećenja ($N_{ot,v,TS}$) i prosečni intervali vremena između dva uzastopna preskoka ($T_{p,TS}$), ispada ($T_{i,v,TS}$) i oštećenja ($T_{ot,v,TS}$), i dalje, iz izraza (11.2.3.2.19.) i (11.2.3.2.20) parametri pouzdanosti autotransformatora 400 kV/220 kV/10 kV, 400 kV/110 kV/10 kV i 220 kV/110 kV/10 kV: očekivani godišnji brojevi proboja ($N_{ot,T}$) i prosečni intervali vremena između dva uzastopna proboja ($T_{ot,T}$) izolacije namotaja.

Prosečni intervali vremena između dva uzastopna preskoka, ispada i oštećenja spoljašnje izolacije TS "Niš 2" za standardizovane podnosive sklopne udarne fazne i međufazne napone naponskog nivoa 400 kV $U_{f,s,400} \geq 850$ kV i $U_{mf,s,400} \geq 1360$ kV_{tv} i za standardizovane podnosive kratkotrajne naizmenične napone industrijske frekvencije naponskih nivoa 220 kV i 110 kV $U_{n,p,220} \geq 275$ kV_{eff} i $U_{n,p,110} \geq 185$ kV_{eff} su sledeći:

$$T_{p,TS} > 20 \text{ god.}, T_{i,v,TS} > 100 \text{ god.} \text{ i } T_{ot,v,TS} > 1000 \text{ god.}$$

Prosečni intervali vremena između dva uzastopna proboja izolacije namotaja autotransformatora za standardizovane podnosive sklopne udarne fazne i međufazne napone naponskog nivoa 400 kV $U_{f,s,400} \geq 850$ kV_{tv} i $U_{mf,s,400} \geq 1360$ kV_{tv} i za standardizovane podnosive kratkotrajne naizmenične napone industrijske frekvencije naponskih nivoa 220 kV i 110 kV $U_{n,p,220} \geq 275$ kV_{eff} i $U_{n,p,110} \geq 185$ kV_{eff} su sledeći

- $T_{ot,T} > 1000$ godina kada su transformatori zaštićeni odvodnicima prenapona sa iskrištem,
- $T_{ot,T} > 10000$ godina kada su transformatori zaštićeni odvodnicima prenapona bez iskrišta.

Prema utvrđenim parametrima pouzdanosti može se konstatovati da je pouzdanost rada TS "Niš 2" znatna i u slučaju korišćenja spoljašnjih i unutrašnjih izolacija najnižih standardizovanih podnosivih napona, pri sklopnim operacijama prekidača u samoj TS i u susjednim TS.

11.2.3.2.2. Sklopni prenaponi u TS 400 kV/220 kV "Beograd 8"

Proračun prenapona na izolaciji TS 400 kV/220 kV "Beograd 8" je izvršen pri 1APU, 3APU i uključenju neopterećenih vodova 400 kV: "Beograd 8 - Drmno", "Beograd 8 - Obrenovac", i "Beograd 8 - Đerdap" i vodova 220 kV: "Beograd 8 - Pančevo 2", "Beograd 8 - Smederevo 3", "Beograd 8 - Beograd 17" i "Beograd 8 - Beograd 3", kao i pri uključenju neopterećenih autotransformatora 400 kV/220 kV/31.5 kV prekidačima 400 kV.

Prenaponsko stanje na spoljašnjoj izolaciji TS "Beograd" i izolaciji namotaja autotransformatora bilo je slično kao i na naponskim nivoima 400 kV i 220 kV u TS "Niš 2".

Utvrđivanje parametara pouzdanosti rada TS "Beograd 8", pri pojavi sklopnih prenapona u njoj, je izvršeno na isti način kao za TS "Niš 2". Vrednosti sračunatih parametara pouzdanosti za TS "Beograd 8" su bliske odgovarajućim vrednostima za TS "Niš 2", te je ista i konstatacija o mogućnosti primene spoljašnje i unutrašnje izolacije najnižih standardizovanih podnosivih napona.

11.2.3.2.3. Sklopni prenaponi u TS 400 kV/110 kV "Bor 2"

Proračun prenapona na izolaciji TS 400 kV/110 kV "Bor 2" je izvršen pri 1APU, 3APU i uključenju neopterećenih vodova 400 kV: "Bor 2 - Đerdap" i "Bor 2 - Niš 2" i vodova 110 kV: "Bor 2 - Majdanpek", "Bor 2 - Zajčar", "Bor 2 - Veliki Krivelj" i "Bor 2 - Negotin", kao i pri uključenju neopterećenih autotransformatora 400 kV/110 kV/10 kV.

Prenaponsko stanje na spoljašnjoj izolaciji TS i izolaciji namotaja autotransformatora je bilo slično kao i na naponskim nivoima 400 kV i 110 kV u TS "Niš 2".

Utvrđivanje parametara pouzdanosti rada TS "Bor 2", pri pojavi sklopnih prenapona u njoj, je izvršeno na isti način kao za TS "Niš 2". Vrednosti sračunatih parametara pouzdanosti za TS "Bor 2" su bliske odgovarajućim vrednostima za TS "Niš 2", te je ista i konstatacija o mogućnosti primene spoljašnje i unutrašnje izolacije najnižih standardizovanih podnosivih napona.

11.2.3.2.4. Sklopni prenaponi u TS 220 kV/110 kV "Požega"

Proračun prenapona na izolaciji TS 220 kV/110 kV "Požega" je izvršen pri 1APU, 3APU i uključenju neopterećenih vodova 220 kV: "Požega - Bajina Bašta", "Požega - Kraljevo 3", "Požega - Pljevlja 2" i "Požega - Čačak 3" i vodova 110 kV: "Požega - Sevojno", "Požega - Beljina", "Požega - Guča" i "Požega - Ivanjica", kao i pri uključenju neopterećenih autotransformatora 220 kV/110 kV/10 kV.

Prenaponsko stanje na spoljašnjoj izolaciji TS "Požega" i izolaciji namotaja autotransformatora je bilo slično kao i na naponskim nivoima 220 kV i 110 kV u TS "Niš 2".

Utvrđivanje parametara pouzdanosti rada TS "Požega", pri pojavi sklopnih prenapona u njoj, je izvršeno na isti način kao za TS "Niš 2". Vrednosti sračunatih parametara pouzdanosti su bliske odgovarajućim vrednostima za TS "Niš 2", te je ista i konstatacija o mogućnosti primene spoljašnje i unutrašnje izolacije najnižih standardizovanih podnosivih napona.

11.2.3.2.5. Sklopni prenaponi u TS 220 kV/110 kV "Beograd 3"

Proračun prenapona na izolaciji TS 220 kV/110 kV "Beograd 3" je izvršen pri 1APU, 3APU i uključenju neopterećenih vodova 220 kV: "Beograd 3 - Obrenovac", "Beograd 3 - Beograd 8" i "Beograd 3 - Bajina Bašta" i vodova 110 kV: "Beograd 3 - Smederevo 2", "Beograd 3 - Beograd 1", "Beograd 3 - Beograd 18" i "Beograd 3 - Pančevo 1", kao i pri uključenju neopterećenih autotransformatora 220 kV/110 kV/10 kV.

Prenaponsko stanje na spoljašnjoj izolaciji TS "Beograd 3" i izolaciji namotaja autotransformatora je bilo slično kao i na naponskim nivoima 220 kV i 110 kV u TS "Niš 2".

Utvrđivanje parametara pouzdanosti rada TS "Beograd 3", pri pojavi sklopnih prenapona u njoj, je izvršeno na isti način kao za TS "Niš 2". Vrednosti sračunatih parametara pouzdanosti su bliske odgovarajućim vrednostima za TS "Niš 2", te je ista i konstatacija o mogućnosti primene spoljašnje i unutrašnje izolacije najnižih standardizovanih podnosivih napona.

11.3. Koordinacija izolacije objekata 400 kV, 220 kV i 110 kV u oblasti atmosferskih i sklopnih prenapona

Pouzdanost rada izolacije objekata visokih napona je rezultat delovanja svih uticajnih skupova atmosferskih i sklopnih prenapona. U nastavku su prezentirani parametri pouzdanosti rada sistema izolacija nadzemnih vodova, spoljašnje izolacije TS i izolacije namotaja energetskih transformatora. Potrebno je istaći da su u postupku utvrđivanja potrebnih podnosivih napona izolacija i njima odgovarajućih parametara pouzdanosti, za primenjenu gromobranksku i prenaponsku zaštitu i date radne uslove, vršena određena uprošćenja ili izbori parametara za proračun (raspodele amplituda i strmina struja groma, otpornosti uzemljenja, brojevi operacija uključenja i APU itd.) koji uvek vode povećanju rizika, dakle, uvek na stranu povećane pouzdanosti. Zbog toga utvrđeni parametri pouzdanosti, odnosno, potrebni podnosivi atmosferski i sklopni udarni naponi i podnosivi kratkotrajni naizmenični naponi industrijske frekvencije, za sve sisteme izolacija objekata visokih napona, sadrže određenu rezervu.

11.3.1. Parametri pouzdanosti izolacije nadzemnih vodova 400 kV, 220 kV i 110 kV pri delovanju sklopnih i atmosferskih prenapona.

U delu 11.1.2. su utvrđeni parametri pouzdanosti izolacije nadzemnih vodova u oblasti atmosferskih prenapona i u delu 11.2.2. u oblasti sklopnih prenapona. Očekivani godišnji brojevi preskoka, ispada i oštećenja i prosečni intervali vremena između dva uzastopna preskoka, ispada i oštećenja izolacije nadzemnih vodova pri delovanju sklopnih prenapona su utvrđeni smatrajući da se usvojeni broj 1APU i 3APU ne menja sa sniženjem podnosivih napona izolacije. Podaci koji su usvojeni za broj APU su ustanovljeni iz statističkih podataka za izolaciju postojećih nadzemnih vodova 400 kV, 220 kV i 110 kV EPS-a. Sa sniženjem podnosivih napona izolacije vodova raste broj APU usled delovanja atmosferskih i sklopnih prenapona i to treba uvažiti u proračunu. Parametri pouzdanosti postojeće izolacije nadzemnih vodova pri delovanju sklopnih i atmosferskih prenapona su utvrđeni iz sledećih izraza:

- očekivani godišnji broj preskoka na vodu ($N_{p,p}$):

$$N_{p,p} = 1 \cdot n_{g,v,p} + N_{p,U,p} + N_{p,1APU,p} + N_{p,3APU,p} = 1 \cdot n_{g,v,p} + N_U (0.2 R_{U,s} + 0.8 R_{U,v}) + \\ + [N_{1APU,u} \cdot (0.2 R_{1APU,s} + 0.8 R_{1APU,v}) + N_{3APU,u} (0.2 R_{3APU,s} + 0.8 R_{3APU,v})] \quad (11.3.1.1.)$$

$$\{N_{p,U,p} = N_U (0.2 R_{U,s} + 0.8 R_{U,v}),$$

$$N_{p,1APU,p} = 1 \cdot N_{1APU,u} (0.2 R_{1APU,s} + 0.8 R_{1APU,v}),$$

$$N_{p,3APU,p} = 1 \cdot N_{3APU,u} (0.2 R_{3APU,s} + 0.8 R_{3APU,v})\};$$

(u usvojene godišnje brojeve 1APU- $N_{1APU,u}$ i 3APU- $N_{3APU,u}$ vodova na 100 km sa postojećom izolacijom uključena su i ona APU koja nastaju usled delovanja sklopnih i atmosferskih prenapona),

- očekivani godišnji broj ispada voda ($N_{i,p}$):

$$N_{i,p} = 1 \cdot n_{g,v,p} (1 - P_{APU}) + N_{p,1APU,p} + N_{p,3APU,p}; \quad (11.3.1.2.)$$

- očekivani godišnji broj oštećenja izolacije voda ($N_{ot,p}$):

$$N_{ot,p} = P_{ot} \cdot N_{i,p}; \quad (11.3.1.3.)$$

- prosečni intervali vremena između dva uzastopna preskoka ($T_{p,p}$), ispada ($T_{i,p}$) i oštećenja ($T_{ot,p}$):

$$T_{p,p} = \frac{1}{N_{p,p}}, \quad (11.3.1.4.)$$

$$T_{i,p} = \frac{1}{N_{i,p}}, \quad (11.3.1.5.)$$

$$T_{ot,p} = \frac{1}{N_{ot,p}}. \quad (11.3.1.6.)$$

Za sniženu izolaciju vodova parametri pouzdanosti izolacije pri delovanju atmosferskih i sklopnih prenapona su utvrđeni iz sledećih izraza:

- očekivani godišnji broj preskoka na vodu ($N_{p,s}$):

$$N_{p,s} = 1 \cdot n_{g,v,s} + N_{p,U,s} + N_{p,1APU,s} + N_{p,3APU,s}, \quad (11.3.1.7.)$$

$$\{N_{p,U,s} = N_U (0.2 R_{U,s} + 0.8 R_{U,v}),$$

$$N_{p,1APU,s} = [N_{p,U,s,j} - N_{p,U,p,j} + l(N_{1APU,u} + n_{g,v,s,j} - n_{g,v,p,j})](0.2 R_{1APU,s} + 0.8 R_{1APU,v}),$$

$$N_{p,3APU,s} = [N_{p,U,s,v} - N_{p,U,p,v} + l(N_{3APU,u} + n_{g,v,s,v} - n_{g,v,p,v})](0.2 R_{3APU,s} + 0.8 R_{3APU,v}),$$

$$n_{g,v,s} = n_{g,v,s,j} + n_{g,v,s,v},$$

$$n_{g,v,p} = n_{g,v,p,j} + n_{g,v,p,v},$$

$$N_{p,U,s} = N_{p,U,s,j} + N_{p,U,s,v},$$

$$N_{p,U,p} = N_{p,U,p,j} + N_{p,U,p,v} \};$$

- očekivani godišnji broj ispada voda ($N_{i,s}$):

$$N_{i,s} = (1 - P_{APU}) (1 \cdot n_{g,v,s} + N_{p,U,s}) + N_{i,1APU,s} + N_{i,3APU,s}, \quad (11.3.1.8.)$$

$$\{N_{i,1APU,s} = \{P_{APU}(N_{p,U,s,j} - N_{p,U,p,j}) + l[N_{1APU,u} + P_{APU}(n_{g,v,s,j} - n_{g,v,p,j})]\}(0.2 R_{1APU,s} + 0.8 R_{1APU,v}),$$

$$N_{i,3APU,s} = \{P_{APU}(N_{p,U,s,v} - N_{p,U,p,v}) + l[N_{3APU,u} + P_{APU}(n_{g,v,s,v} - n_{g,v,p,v})]\}(0.2 R_{3APU,s} + 0.8 R_{3APU,v})\};$$

- očekivani godišnji broj oštećenja izolacije voda ($N_{ot,s}$):

$$N_{ot,s} = P_{ot} N_{i,s};$$

- prosečni intervali vremena između dva uzastopna preskoka ($T_{p,s}$), ispada ($T_{i,s}$) i oštećenja ($T_{ot,s}$):

$$T_{p,s} = \frac{1}{N_{p,s}}, \quad (11.3.1.9.)$$

$$T_{i,s} = \frac{1}{N_{i,s}}, \quad (11.3.1.10.)$$

$$T_{ot,s} = \frac{1}{N_{ot,s}}. \quad (11.3.1.11.)$$

Ovde su:

$N_{p,p}$, $N_{i,p}$, $N_{ot,p}$ - očekivani godišnji brojevi preskoka, ispada i oštećenja na vodu sa postojećom izolacijom pri delovanju sklopnih i atmosferskih prenapona,

$N_{p,s}$, $N_{i,s}$, $N_{ot,s}$ - očekivani godišnji brojevi preskoka, ispada i oštećenja na vodu sa sniženom izolacijom pri delovanju sklopnih i atmosferskih prenapona,

$T_{p,p}$, $T_{i,p}$, $T_{ot,p}$ - prosečni intervali vremena između dva uzastopna preskoka, ispada i oštećenja na vodu sa postojećom izolacijom pri delovanju sklopnih i atmosferskih prenapona,

$T_{p,s}$, $T_{i,s}$, $T_{ot,s}$ - prosečni intervali vremena između dva uzastopna preskoka, ispada i oštećenja na vodu sa sniženom izolacijom pri delovanju sklopnih i atmosferskih prenapona,

l - dužina voda izražena u jediničnim vrednostima od 100 km,

$n_{g,v,p}$, $n_{g,v,s}$ - ukupan broj preskoka godišnje na 100 km voda sa postojećom i sniženom izolacijom pri delovanju atmosferskih prenapona,

$n_{g,v,p,j}$, $n_{g,v,s,j}$ - broj jednofaznih preskoka godišnje na 100 km voda sa postojećom i sniženom izolacijom pri delovanju atmosferskih prenapona,

$n_{g,v,p,v}$, $n_{g,v,s,v}$ - broj višefaznih preskoka godišnje na 100 km voda sa postojećom i sniženom izolacijom pri delovanju atmosferskih prenapona,

$N_{p,U,p}$, $N_{p,U,s}$ - ukupan broj preskoka godišnje pri uključenju neopterećenog voda sa postojećom i sniženom izolacijom,

$N_{p,U,p,j}$, $N_{p,U,s,j}$ - broj jednofaznih preskoka godišnje pri uključenju neopterećenog voda sa postojećom i sniženom izolacijom ($N_{p,U,p,j} \approx N_{p,U,p}$; $N_{p,U,s,j} \approx N_{p,U,s}$),

$N_{p,U,p,v}$, $N_{p,U,s,v}$ - broj višefaznih preskoka godišnje pri uključenju neopterećenog voda sa postojećom i sniženom izolacijom ($N_{p,U,p,v} \ll N_{p,U,p,j}$; $N_{p,U,s,v} \ll N_{p,U,s,j}$; usvojeno $N_{p,U,p,v} = 0$ i $N_{p,U,s,v} = 0$),

$N_{p,1APU,p}$, $N_{p,1APU,s}$ - broj preskoka godišnje pri 1APU na 100 km voda sa postojećom i sniženom izolacijom,

$N_{p,3APU,p}$, $N_{p,3APU,s}$ - broj preskoka godišnje pri 3APU na 100 km voda sa postojećom i sniženom izolacijom,

P_{APU} - verovatnoća uspešnosti intervencije APU na vodovima usled preskoka izazvanih sklopnim i atmosferskim prenaponima ($P_{APU} = 0.9$),

P_{ot} - verovatnoća oštećenja izolacije pri ispadima vodova usled delovanja sklopnih i atmosferskih prenapona ($P_{ot} = 0.1$),

$R_{U,s}$, $R_{U,v}$ - rizici preskoka na vodu sa suvom i vlažnom izolacijom (postojećom ili sniženom) pri njegovom uključenju u neopterećenom stanju,

$R_{1APU,s}$, $R_{1APU,v}$ - rizici preskoka na vodu sa suvom i vlažnom izolacijom (postojećom ili sniženom) pri njegovom 1APU,

$R_{3APU,s}$, $R_{3APU,v}$ - rizici preskoka na vodu sa suvom i vlažnom izolacijom (postojećom ili sniženom) pri njegovom 3APU,

N_U - godišnji broj uključenja neopterećenog voda sa postojećom ili sniženom izolacijom ($N_U=10$),

$N_{1APU,u}$ - usvojeni godišnji broj 1APU na 100 km voda sa postojećom izolacijom (400 kV: $N_{1APU,u} = 7$; 220 kV: $N_{1APU,u} = 6$; 110 kV: $N_{1APU,u} = 9$),

$N_{3APU,u}$ - usvojeni godišnji broj 3APU na 100 km voda sa postojećom izolacijom (400 kV: $N_{3APU,u} = 0.5$; 220 kV: $N_{3APU,u} = 1$; 110 kV: $N_{3APU,u} = 3$).

Utvrđeni parametri pouzdanosti razmatranih nadzemnih vodova 400 kV, 220 kV i 110 kV sa postojećom i sniženom izolacijom pri delovanju atmosferskih i sklopnih prenapona su dati u tabelama 11.3.1.1., 11.3.1.2. i 11.3.1.3. (Usvojeno je da su otpornosti uzemljenja stubova nadzemnih vodova 10Ω , broj uključenja $N_U=10$ po vodu godišnje, broj APU $N_{APU}=7.5$ na 100 km dužine vodova 400 kV, $N_{APU} = 7$ na 100 km dužine vodova 220 kV i $N_{APU} = 12$ na 100 km dužine vodova 110 kV).

Prosečan broj APU na vodovima 400 kV korišćen u proračunu (7.5 na 100 km) je vrlo visok, pa su i parametri pouzdanosti vodova osetno nepovoljniji. Preskoci i aktiviranje APU na vodovima 400 kV, prema evidenciji "Elektroistoka", su najčešći na području Vojvodine leti u ranim jutarnjim časovima, što je siguran znak da nastaju usled zagađenja, odnosno, nekorektno izabrane strujne staze, i da nisu posledica prenapona. Korektno dimenzionisana izolacija i strujne staze, isključuje ove preskoke, te se broj aktiviranja APU znatno smanjuje i u uslovima mreže EPS-a ne nadmašuje 3 operacije na 100 km dužine voda godišnje.

Za sve vodove 400 kV izvršen je proračun parametara pouzdanosti i sa po 3 APU na 100 km godišnje; za najduže vodove, sa izolacijom standardizovanih podnosivih atmosferskih udarnih faznih napona ($U_{f,a}$) i sklopnih udarnih faznih ($U_{f,s}$) i međufaznih napona ($U_{mf,s}$), prosečni intervali vremena između dva uzastopna ispada (T_i) i oštećenja (T_{ot}) iznose:

- vod "Beograd 8 - Đerdap 1":

$$T_i > 1.5 \text{ god. i } T_{ot} > 15 \text{ god. za } U_{f,a} = 1175 \text{ kV}_{tv}, U_{f,s} = 950 \text{ kV}_{tv} \text{ i } U_{mf,s} = 1425 \text{ kV}_{tv},$$

$$T_i > 0.4 \text{ god. i } T_{ot} > 4 \text{ god. za } U_{f,a} = 1050 \text{ kV}_{tv}, U_{f,s} = 850 \text{ kV}_{tv} \text{ i } U_{mf,s} = 1360 \text{ kV}_{tv};$$

- vod "Drmno-Đerdap 1":

$$T_i > 4 \text{ god. i } T_{ot} > 40 \text{ god. za } U_{f,a} = 1175 \text{ kV}_{tv}, U_{f,s} = 950 \text{ kV}_{tv} \text{ i } U_{mf,s} = 1425 \text{ kV}_{tv},$$

$$T_i > 0.9 \text{ god. i } T_{ot} > 9 \text{ god. za } U_{f,a} = 1050 \text{ kV}_{tv}, U_{f,s} = 850 \text{ kV}_{tv} \text{ i } U_{mf,s} = 1360 \text{ kV}_{tv}.$$

Proračuni na vodovima 400 kV, 220 kV i 110 kV su izvršeni kada su na istim bili priključeni kapacitivni naponski transformatori. Kada bi umesto kapacitivnih bili prisutni induktivni naponski transformatori, prenaponi na vodovima pri operacijama 3APU se svrstavaju u grupu prenapona pri normalnim operacijama uključanja, a prenaponi pri 1APU postaju manje uticajni nego prenaponi pri normalnim uključanjima. Za najduže vodove 400 kV, 220 kV i 110 kV su izračunati parametri pouzdanosti kada su na istim priključeni, umesto kapacitivnih, induktivni naponski transformatori; prosečni intervali vremena između dva uzastopna ispada (T_i) i oštećenja (T_{ot}) na vodovima, sa izolacijom standardizovanih kratkotrajnih naizmeničnih napona industrijske frekvencije ($U_{n,p}$), podnosivih atmosferskih udarnih faznih napona ($U_{f,a}$) i sklopnih udarnih faznih ($U_{f,s}$) i međufaznih napona ($U_{mf,s}$), iznose:

- vod 400 kV "Beograd 8 - Đerdap 1":

$$T_i > 2 \text{ god. i } T_{ot} > 20 \text{ god. za } U_{f,a} = 1175 \text{ kV}_{tv}, U_{f,s} = 950 \text{ kV}_{tv} \text{ i } U_{mf,s} = 1425 \text{ kV}_{tv},$$

$$T_i > 0.5 \text{ god. i } T_{ot} > 5 \text{ god. za } U_{f,a} = 1050 \text{ kV}_{tv}, U_{f,s} = 850 \text{ kV}_{tv} \text{ i } U_{mf,s} = 1360 \text{ kV}_{tv};$$

- vod 400 kV "Drmno - Đerdap 1":

$$T_i > 5 \text{ god. i } T_{ot} > 50 \text{ god. za } U_{f,a} = 1175 \text{ kV}_{tv}, U_{f,s} = 950 \text{ kV}_{tv} \text{ i } U_{mf,s} = 1425 \text{ kV}_{tv},$$

$$T_i > 1 \text{ god. i } T_{ot} > 10 \text{ god. za } U_{f,a} = 1050 \text{ kV}_{tv}, U_{f,s} = 850 \text{ kV}_{tv} \text{ i } U_{mf,s} = 1360 \text{ kV}_{tv};$$

- vod 220 kV "Beograd - Bajina Bašta":

$$T_i > 1.7 \text{ god. i } T_{ot} > 17 \text{ god. za } U_{n,p} = 360 \text{ kV}_{eff} \text{ i } U_{f,a} = 850 \text{ kV}_{tv},$$

$$T_i > 1 \text{ god. i } T_{ot} > 10 \text{ god. za } U_{n,p} = 320 \text{ kV}_{eff} \text{ i } U_{f,a} = 750 \text{ kV}_{tv},$$

$T_i > 0.15$ god. i $T_{ot} > 1.5$ god. za $U_{n,p} = 275$ kV_{eff} i $U_{f,a} = 650$ kV_{tv};

- vod 110 kV "Niš 2 - Pirot":

$T_i > 1$ god. i $T_{ot} > 10$ god. za $U_{n,p} = 185$ kV_{eff} i $U_{f,a} = 450$ kV_{tv}.

Na osnovu analize parametara pouzdanosti nadzemnih vodova 400 kV, 220 kV i 110 kV pri delovanju atmosferskih i sklopnih prenapona na njihovu izolaciju, može se konstatovati sledeće:

- Nadzemni vodovi 400 kV imaju zadovoljavajuću pouzdanost rada sa izolacijama sledećih standardizovanih podnosivih atmosferskih udarnih faznih napona ($U_{f,a}$) i sklopnih udarnih faznih ($U_{f,s}$) i međufaznih napona ($U_{mf,s}$):
 - za dužine vodova približno do 100 km $U_{f,a} \geq 1050$ kV_{tv}, $U_{f,s} \geq 850$ kV_{tv} i $U_{mf,s} \geq 1360$ kV_{tv},
 - za dužine vodova preko 100 km $U_{f,a} \geq 1175$ kV_{tv}, $U_{f,s} \geq 950$ kV_{tv} i $U_{mf,s} \geq 1425$ kV_{tv}.
- Nadzemni vodovi 220 kV imaju zadovoljavajuću pouzdanost rada sa izolacijama sledećih standardizovanih podnosivih kratkotrajnih naizmeničnih napona industrijske frekvencije ($U_{n,p}$) i atmosferskih udarnih faznih napona ($U_{f,a}$):
 - za dužine vodova približno do 100 km $U_{n,p} \geq 325$ kV_{eff} i $U_{f,a} \geq 750$ kV_{tv},
 - za dužine vodova preko 100 km $U_{n,p} \geq 360$ kV_{eff} i $U_{f,a} \geq 850$ kV_{tv}.
- Nadzemni vodovi 110 kV imaju zadovoljavajuću pouzdanost rada sa izolacijama sledećih standardizovanih podnosivih kratkotrajnih naizmeničnih napona industrijske frekvencije ($U_{n,p}$) i atmosferskih udarnih faznih napona ($U_{f,a}$):
 - za dužine vodova približno do 50 km $U_{n,p} \geq 185$ kV_{eff} i $U_{f,a} \geq 450$ kV_{tv},
 - za dužine vodova preko 50 km $U_{n,p} \geq 230$ kV_{eff} i $U_{f,a} \geq 550$ kV_{tv}.

Tabela 11.3.1.1. Očekivani godišnji brojevi preskoka (N_p), ispada (N_i) i oštećenja (N_{ot}) i prosečni intervali vremena između dva uzastopna preskoka (T_p), ispada (T_i) i oštećenja (T_{ot}) na izolaciji nadzemnih vodova 400 kV EPS pri delovanju atmosferskih i sklopnih prenapona

Redni broj	Nadzemni vod 400 kV	Podnosivi atmosferski i sklopni udarni fazni (U_f) i međufazni (U_{mf}) naponi izolacije voda		Očekivani godišnji brojevi preskoka (N_p), ispada (N_i) i oštećenja (N_{ot}) i prosečni intervali vremena između dva uzastopna preskoka (T_p), ispada (T_i) i oštećenja (T_{ot})					
		atmosferski U_{fa} kV _{IV}	sklopni $U_{fs}/U_{mf,s}$ kV _{IV} /kV _{IV}	N_p	T_p (god.)	N_i	T_i (god.)	N_{ot}	T_{ot} (god.)
1	Drmno - Đerdap 1 (154 km)	1425	1050/1575	<1.1	>0.9	<0.12	>8.3	<0.012	>83
		1300	950/1425	<1.5	>0.67	<0.26	>3.8	<0.026	>38
		1175	950/1425	<1.7	>0.59	<0.28	>3.6	<0.028	>36
		1175	850/1360	<5.3	>0.19	<1.5	>0.67	<0.15	>6.7
		1050	850/1360	<5.6	>0.18	<1.7	>0.59	<0.17	>5.9
2	Drmno - Pančevo 2 (50 km)	1425	1050/1575	<0.34	>2.9	<0.03	>33	<0.003	>330
		1300	950/1425	<0.44	>2.3	<0.04	>25	<0.004	>250
		1175	950/1425	<0.5	>2	<0.05	>20	<0.005	>200
		1175	850/1360	<0.62	>1.6	<0.08	>12	<0.008	>120
		1050	850/1360	<0.69	>1.4	<0.09	>11	<0.009	>110
3	Drmno - Beograd 8 (86 km)	1425	1050/1575	<0.61	>1.6	<0.06	>17	<0.006	>170
		1300	950/1425	<0.83	>1.2	<0.1	>10	<0.01	>100
		1175	950/1425	<0.89	>1.1	<0.11	>9.1	<0.011	>91
		1175	850/1360	<1.7	>0.59	<0.3	>3.3	<0.03	>33
		1050	850/1360	<1.8	>0.56	<0.31	>3.2	<0.031	>32
4	Beograd 8 - Đerdap 1 (203 km)	1425	1050/1575	<1.6	>0.6	<0.3	>3.3	<0.03	>33
		1300	950/1425	<3.5	>0.29	<1.2	>0.83	<0.12	>8.3
		1175	950/1425	<3.7	>0.27	<1.3	>0.77	<0.13	>7.7
		1175	850/1360	<9	>0.11	<4.7	>0.21	<0.47	>2.1
		1050	850/1360	<9.6	>0.1	<4.8	>0.21	<0.48	>2.1
5	Beograd 8 - Obrenovac (49 km)	1425	1050/1575	<0.34	>2.9	<0.03	>33	<0.003	>330
		1300	950/1425	<0.44	>2.3	<0.04	>25	<0.004	>250
		1175	950/1425	<0.5	>2	<0.05	>20	<0.005	>200
		1175	850/1360	<0.5	>2	<0.05	>20	<0.005	>200
		1050	850/1360	<0.6	>1.7	<0.06	>17	<0.006	>170

Tabela 11.3.1.1. Očekivani godišnji brojevi preskoka (N_p), ispada (N_i) i oštećenja (N_{ot}) i prosečni intervali vremena između dva uzastopna preskoka (T_p), ispada (T_i) i oštećenja (T_{ot}) na izolaciji nadzemnih vodova 400 kV EPS pri delovanju atmosferskih i sklopnih prenapona

Redni broj	Nadzemni vod 400 kV	Podnosivi atmosferski i sklopni udarni fazni (U_f) i međufazni (U_{mf}) naponi izolacije voda		Očekivani godišnji brojevi preskoka (N_p), ispada (N_i) i oštećenja (N_{ot}) i prosečni intervali vremena između dva uzastopna preskoka (T_p), ispada (T_i) i oštećenja (T_{ot})					
		atmosferski $U_{f,a}$ kV _{tv}	sklopni $U_{f,s}/U_{mf,s}$ kV _{tv} /kV _{tv}	N_p	T_p (god.)	N_i	T_i (god.)	N_{ot}	T_{ot} (god.)
6	Bor 2 - Niš 2 (99 km)	1425	1050/1575	<0.7	>1.4	<0.07	>14	<0.007	>140
		1300	950/1425	<1.1	>0.9	<0.14	>7.1	<0.014	>71
		1175	950/1425	<1.3	>0.77	<0.15	>6.7	<0.015	>67
		1175	850/1360	<2.8	>0.36	<0.53	>1.9	<0.053	>19
		1050	850/1360	<3	>0.33	<0.55	>1.8	<0.055	>18
7	Bor 2 - Đerdap 1 (83 km)	1425	1050/1575	<0.58	>1.7	<0.06	>17	<0.006	>170
		1300	950/1425	<0.75	>1.3	<0.08	>12	<0.008	>120
		1175	950/1425	<0.85	>1.2	<0.09	>11	<0.009	>110
		1175	850/1360	<1	>1	<0.18	>5.6	<0.018	>56
		1050	850/1360	<1.2	>0.83	<0.19	>5.3	<0.019	>53
8	Niš 2 - Kosovo B (124 km)	1425	1050/1575	<0.87	>1.1	<0.09	>11	<0.009	>110
		1300	950/1425	<1.2	>0.83	<0.14	>7.1	<0.014	>71
		1175	950/1425	<1.3	>0.77	<0.15	>6.7	<0.015	>67
		1175	850/1360	<2.4	>0.42	<0.41	>2.4	<0.041	>24
		1050	850/1360	<2.6	>0.38	<0.43	>2.3	<0.043	>23
9	Niš 2 - Kragujevac (137 km)	1425	1050/1575	<0.97	>1	<0.1	>10	<0.01	>100
		1300	950/1425	<1.3	>0.77	<0.17	>5.9	<0.017	>59
		1175	950/1425	<1.4	>0.71	<0.18	>5.6	<0.018	>56
		1175	850/1360	<2.1	>0.48	<0.62	>1.6	<0.062	>16
		1050	850/1360	<2.3	>0.43	<0.65	>1.5	<0.065	>15

Tabela 11.3.1.2. Očekivani godišnji brojevi preskoka (N_p), ispada (N_i) i oštećenja (N_{ot}) i prosečni intervali vremena između dva uzastopna preskoka (T_p), ispada (T_i) i oštećenja (T_{ot}) na izolaciji nadzemnih vodova 220 kV EPS pri delovanju atmosferskih i sklopnih prenapona

Redni broj	Nadzemni vod 220 kV	Podnosivi atmosferski udarni fazni napon ($U_{f.a}$) i standardni kratkotrajni podnosivi napon ($U_{n.n}$) ind.frekvencije izolacije voda		Očekivani godišnji brojevi preskoka (N_p), ispada (N_i) i oštećenja (N_{ot}) i prosečni intervali vremena između dva uzastopna preskoka (T_p), ispada (T_i) i oštećenja (T_{ot})					
		$U_{f.a}$ kV _{iv}	$U_{n.n}$ kV _{eff}	N_p	T_p (god.)	N_i	T_i (god.)	N_{ot}	T_{ot} (god.)
1	Niš 2 - Leskovac 2 (39 km)	1050	460	<0.8	>1.2	<0.08	>12	<0.008	>120
		950	395	<0.9	>1.1	<0.09	>11	<0.009	>110
		850	360	<1	>1	<0.1	>10	<0.01	>100
		750	325	<1.3	>0.77	<0.14	>7.1	<0.014	>71
		650	275	<2	>0.5	<0.43	>2.3	<0.043	>23
2	Niš 2 - Kruševac 1 (72 km)	1050	460	<1.5	>0.66	<0.15	>6.6	<0.015	>66
		950	395	<1.7	>0.59	<0.17	>5.9	<0.017	>59
		850	360	<2	>0.5	<0.24	>4.2	<0.024	>42
		750	325	<3.2	>0.31	<0.52	>1.9	<0.052	>19
		650	275	<12	>0.08	<4	>0.25	<0.4	>2.5
3	Beograd 8 - Pančevo 2 (14 km)	1050	460	<0.3	>3.3	<0.03	>33	<0.003	>330
		950	395	<0.3	>3.3	<0.03	>33	<0.003	>330
		850	360	<0.4	>2.5	<0.04	>25	<0.004	>250
		750	325	<0.5	>2	<0.05	>20	<0.005	>200
		650	275	<0.7	>1.4	<0.07	>14	<0.007	>140
4	Beograd 8 - Beograd 17 (9.2 km)	1050	460	<0.2	>5	<0.02	>50	<0.002	>500
		950	395	<0.2	>5	<0.02	>50	<0.002	>500
		850	360	<0.25	>4	<0.025	>40	<0.0025	>400
		750	325	<0.3	>3.3	<0.03	>33	<0.003	>330
		650	275	<0.4	>2.5	<0.04	>25	<0.004	>250

Tabela 11.3.1.2. Očekivani godišnji brojevi preskoka (N_p), ispada (N_i) i oštećenja (N_{ot}) i prosečni intervali vremena između dva uzastopna preskoka (T_p), ispada (T_i) i oštećenja (T_{ot}) na izolaciji nadzemnih vodova 220 kV EPS pri delovanju atmosferskih i sklopnih prenapona

Redni broj	Nadzemni vod 220 kV	Podnosivi atmosferski udarni fazni napon ($U_{f.a}$) i standardni kratkotrajni podnosivi napon ($U_{n.p}$) ind.frekvencije izolacije voda		Očekivani godišnji brojevi preskoka (N_p), ispada (N_i) i oštećenja (N_{ot}) i prosečni intervali vremena između dva uzastopna preskoka (T_p), ispada (T_i) i oštećenja (T_{ot})					
		$U_{f.a}$ kV _{iv}	$U_{n.p}$ kV _{eff}	N_p	T_p (god.)	N_i	T_i (god.)	N_{ot}	T_{ot} (god.)
5	Beograd 8 - Smederevo (37 km)	1050	460	<0.8	>1.2	<0.08	>12	<0.008	>120
		950	395	<0.8	>1.2	<0.08	>12	<0.008	>120
		850	360	<1	>1	<0.1	>10	<0.01	>100
		750	325	<1.2	>0.8	<0.13	>7.7	<0.013	>78
		650	275	<4	>0.25	<0.81	>1.2	<0.081	>12
6	Beograd 3 - Obrenovac (33 km)	1050	460	<0.7	>1.4	<0.07	>14	<0.007	>140
		950	395	<0.8	>1.2	<0.08	>12	<0.008	>120
		850	360	<0.9	>1.1	<0.09	>11	<0.009	>110
		750	325	<1.1	>0.9	<0.12	>8.3	<0.012	>83
		650	275	<3.8	>0.26	<0.78	>1.3	<0.078	>13
7	Beograd 3 - Beograd 8 (1.6 km)	1050	460	<0.03	>33	<0.003	>330	<0.0003	>3300
		950	395	<0.03	>33	<0.003	>330	<0.0003	>3300
		850	360	<0.04	>25	<0.004	>250	<0.0004	>2500
		750	325	<0.05	>20	<0.005	>200	<0.0005	>2000
		650	275	<0.07	>14	<0.007	>140	<0.0007	>1400
8	Beograd 3 - Bajina Bašta (145 km)	1050	460	<3	>0.33	<0.3	>3.3	<0.03	>33
		950	395	<3.4	>0.29	<0.36	>2.8	<0.036	>28
		850	360	<4.6	>0.22	<0.64	>1.6	<0.064	>16
		750	325	<6.9	>0.14	<1.6	>0.63	<0.16	>6.3
		650	275	<20	>0.05	<8.2	>0.12	<0.82	>1.2

Tabela 11.3.1.2. Očekivani godišnji brojevi preskoka (N_p), ispada (N_i) i oštećenja (N_{ot}) i prosečni intervali vremena između dva uzastopna preskoka (T_p), ispada (T_i) i oštećenja (T_{ot}) na izolaciji nadzemnih vodova 220 kV EPS pri delovanju atmosferskih i sklopnih prenapona

Redni broj	Nadzemni vod 220 kV	Podnosivi atmosferski udarni fazni napon ($U_{f,a}$) i standardni kratkotrajni podnosivi napon ($U_{n,v}$) ind.frekvencije izolacije voda		Očekivani godišnji brojevi preskoka (N_p), ispada (N_i) i oštećenja (N_{ot}) i prosečni intervali vremena između dva uzastopna preskoka (T_p), ispada (T_i) i oštećenja (T_{ot})					
		$U_{f,a}$ kV _{tv}	$U_{n,v}$ kV _{eff}	N_p	T_p (god.)	N_i	T_i (god.)	N_{ot}	T_{ot} (god.)
9	Požega - Kraljevo (65 km)	1050	460	<1.4	>0.71	<0.14	>7.1	<0.014	>71
		950	395	<1.5	>0.67	<0.15	>6.7	<0.015	>67
		850	360	<1.8	>0.56	<0.21	>4.8	<0.021	>48
		750	325	<2.6	>0.38	<0.46	>2.2	<0.046	>22
		650	275	<9.2	>0.11	<3.6	>0.28	<0.36	>2.8
10	Požega - Bajina Bašta (49 km)	1050	460	<1	>1	<0.1	>10	<0.01	>100
		950	395	<1.1	>0.9	<0.12	>8.3	<0.012	>83
		850	360	<1.3	>0.77	<0.17	>5.9	<0.017	>59
		750	325	<1.9	>0.53	<0.3	>3.3	<0.03	>33
		650	275	<6.6	>0.15	<1.9	>0.53	<0.19	>5.3
11	Požega - Pljevlja 2 (92 km)	1050	460	<1.9	>0.53	<0.19	>5.3	<0.019	>53
		950	395	<2.1	>0.48	<0.22	>4.5	<0.022	>45
		850	360	<2.6	>0.38	<0.3	>3.3	<0.03	>33
		750	325	<3.5	>0.29	<0.62	>1.6	<0.062	>16
		650	275	<11	>0.09	<4.2	>0.24	<0.42	>2.4
12	Požega - Čačak (31 km)	1050	460	<0.6	>1.7	<0.06	>17	<0.006	>170
		950	395	<0.7	>1.4	<0.07	>14	<0.007	>140
		850	360	<0.8	>1.2	<0.09	>11	<0.009	>110
		750	325	<1.1	>0.9	<0.14	>7.1	<0.014	>71
		650	275	<3.8	>0.26	<0.8	>1.2	<0.08	>12

Tabela 11.3.1.3. Očekivani godišnji brojevi preskoka (N_p), ispada (N_i) i oštećenja (N_{ot}) i prosečni intervali vremena između dva uzastopna preskoka (T_p), ispada (T_i) i oštećenja (T_{ot}) na izolaciji nadzemnih vodova 110 kV EPS pri delovanju atmosferskih i sklopnih prenapona

Redni broj	Nadzemni vod 110 kV	Podnosivi atmosferski udarni fazni napon ($U_{f,a}$) i standardni kratkotrajni podnosivi napon ($U_{n,p}$) ind.frekvencije izolacije voda		Očekivani godišnji brojevi preskoka (N_p), ispada (N_i) i oštećenja (N_{ot}) i prosečni intervali vremena između dva uzastopna preskoka (T_p), ispada (T_i) i oštećenja (T_{ot})					
		$U_{f,a}$ kV _{tv}	$U_{n,p}$ kV _{eff}	N_p	T_p (god.)	N_i	T_i (god.)	N_{ot}	T_{ot} (god.)
1	Niš 2 - Leskovac (48 km)	550 450	230 185	<3.9 <6	>0.26 >0.17	<0.39 <0.71	>2.6 >1.4	<0.039 <0.071	>26 >14
2	Niš 2 - Pirot 2 (62 km)	550 450	230 185	<5.1 <8.3	>0.2 >0.12	<0.54 <1.2	>1.9 >0.83	<0.054 <0.12	>19 >8.3
3	Niš 2 - Niš 3 (6.3 km)	550 450	230 185	<0.5 <0.8	>2 >1.2	<0.05 <0.08	>20 >12	<0.005 <0.008	>200 >120
4	Niš 2 - Niš 1 (14.5 km)	550 450	230 185	<1.2 <1.8	>0.83 >0.56	<0.12 <0.18	>8.3 >5.6	<0.012 <0.018	>83 >56
5	Bor 2 - Majdanpek 2 (44 km)	550 450	230 185	<3.6 <5.4	>0.28 >0.19	<0.36 <0.62	>2.8 >1.6	<0.036 <0.062	>28 >16
6	Bor 2 - Zaječar 2 (20 km)	550 450	230 185	<1.6 <2.4	>0.63 >0.42	<0.16 <0.25	>6.3 >4	<0.016 <0.025	>63 >40
7	Bor 2 - Veliki Krivelj (8.8 km)	550 450	230 185	<0.7 <1.1	>1.4 >0.91	<0.07 <0.11	>14 >9.1	<0.007 <0.011	>140 >91

Tabela 11.3.1.3. Očekivani godišnji brojevi preskoka (N_p), ispada (N_i) i oštećenja (N_{ot}) i prosečni intervali vremena između dva uzastopna preskoka (T_p), ispada (T_i) i oštećenja (T_{ot}) na izolaciji nadzemnih vodova 110 kV EPS pri delovanju atmosferskih i sklopnih prenapona

Redni broj	Nadzemni vod 110 kV	Podnosivi atmosferski udarni fazni napon ($U_{f.a}$) i standardni kratkotrajni podnosivi napon ($U_{n.p}$) ind.frekvencije izolacije voda		Očekivani godišnji brojevi preskoka (N_p), ispada (N_i) i oštećenja (N_{ot}) i prosečni intervali vremena između dva uzastopna preskoka (T_p), ispada (T_i) i oštećenja (T_{ot})					
		$U_{f.a}$ kV _{tv}	$U_{n.p}$ kV _{eff}	N_p	T_p (god.)	N_i	T_i (god.)	N_{ot}	T_{ot} (god.)
8	Požega - Sevojno (15 km)	550	230	<1.2	0.83	<0.12	>8.3	<0.012	>83
		450	185	<1.8	>0.56	<0.18	>5.6	<0.018	>56
9	Požega - Beljina (54 km)	550	230	<4.4	>0.23	<0.46	>2.2	<0.046	>22
		450	185	<7	>0.14	<0.97	>1	<0.097	>10
10	Požega - Guča (16 km)	550	230	<1.3	>0.77	<0.13	>7.7	<0.013	>77
		450	185	<1.9	>0.53	<0.19	>5.3	<0.019	>53
11	Požega - Ivanjica (29 km)	550	230	<2.4	>0.42	<0.24	>4.2	<0.024	>42
		450	185	<3.5	>0.29	<0.38	>2.6	<0.038	>26
12	Beograd 3 - Smederevo 2 (42 km)	550	230	<3.4	>0.29	<0.324	>2.9	<0.034	>29
		450	185	<5.5	>0.18	<0.69	>1.4	<0.069	>14
13	Beograd 3 - Beograd 1 (16 km)	550	230	<1.3	>0.77	<0.13	>7.7	<0.013	>77
		450	185	<2	>0.5	<0.24	>4.2	<0.024	>42
14	Beograd 3 - Beograd 18 (30 km)	550	230	<2.5	>0.4	<0.25	>4	<0.025	>40
		450	185	<3.9	>0.26	<0.51	>2	<0.051	>20
15	Beograd 3 - Pančevo 1 (25 km)	550	230	<2.1	>0.48	<0.21	>4.8	<0.021	>48
		450	185	<3.2	>0.31	<0.38	>2.6	<0.038	>26

11.3.2. Parametri pouzdanosti izolacije transformatorskih stanica 400 kV/220 kV, 400 kV/110 kV i 220 kV/110 kV pri delovanju sklopnih i atmosferskih prenapona

U delu 11.1.3. su utvrđeni parametri pouzdanosti izolacije tipičnih TS 400 kV/220 kV, TS 400 kV/110 kV i TS 220 kV/110 kV u dve različite konfiguracije pri delovanju atmosferskih prenapona i u delu 11.2.3. pri delovanju sklopnih prenapona u konkretnim TS i to: TS 400 kV/220 kV/110 kV "Niš 2", TS 400 kV/220 kV "Beograd 8", TS 400 kV/110 kV "Bor 2", TS 220 kV/110 kV "Požega" i TS 220 kV/110 kV "Beograd 3". Ukupan broj ispada, odnosno oštećenja spoljašnje izolacije usled preskoka u TS predstavlja zbir ispada, odnosno oštećenja pri delovanju sklopnih i pri delovanju atmosferskih prenapona, a interval vremena između dva uzastopna ispada, odnosno oštećenja kao recipročna vrednost ukupnog broja ispada, odnosno oštećenja.

Pouzdanost rada razmatranih TS 400 kV/220 kV, TS 400 kV/110 kV i TS 220 kV/110 kV sa spoljašnjom izolacijom i najnižih standardizovanih podnosivih napona je veoma visoka za skupove sklopnih prenapona koji se pojavljuju u njima u odnosu na pouzdanost rada za skupove atmosferskih prenapona u tipičnim TS. Kao tipične TS su usvojene TS 400 kV/220 kV sa 3 voda 400 kV i 4 voda 220 kV, TS 400 kV/110 kV sa 3 voda 400 kV i 5 vodova 110 kV i TS 220 kV/110 kV sa 4 voda 220 kV i 5 vodova 110 kV, svaka sa dva energetska transformatora. Za procenu pouzdanosti rada tipičnih TS u oblasti sklopnih prenapona usvojeni su najbolji pokazatelji pouzdanosti u razmatranim konkretnim TS. Pomoću njih i parametara pouzdanosti pri delovanju atmosferskih prenapona procenjeni su parametri pouzdanosti rada tipičnih TS 400 kV/220 kV, TS 400 kV/110 kV i 220 kV/110 kV uvažavajući sve skupove sklopnih i atmosferskih prenapona i dati u tabeli 11.3.2.1.

Na osnovu analize parametara pouzdanosti TS 400 kV/220 kV, TS 400 kV/110kV i TS 220 kV/110 kV pri delovanju sklopnih i atmosferskih prenapona može se konstatovati sledeće:

- Transformatorske stanice 400 kV/220 kV imaju zadovoljavajuću pouzdanost rada sa spoljašnjom izolacijom najnižih standardizovanih podnosivih atmosferskih faznih ($U_{f,a}$), sklopnih faznih ($U_{f,s}$) i međufaznih ($U_{mf,s}$) i kratkotrajnih naizmeničnih ($U_{n,p}$) napona industrijske frekvencije:

- za naponski nivo 400 kV: $U_{f,a} \geq 1050 \text{ kV}_{\text{tv}}$, $U_{f,s} \geq 850 \text{ kV}_{\text{tv}}$ i $U_{mf,s} \geq 1360 \text{ kV}_{\text{tv}}$,
- za naponski nivo 220 kV: $U_{f,a} \geq 650 \text{ kV}_{\text{tv}}$ i $U_{n,p} \geq 275 \text{ kV}_{\text{eff}}$,

za sve varijante gromobranske zaštite. Naravno najveća pouzdanost je u varijanti zaštite samo gromobranskim užadima na celoj površini TS.

- Transformatorske stanice 400 kV/110 kV imaju zadovoljavajuću pouzdanost rada sa spoljašnjom izolacijom sledećih standardizovanih podnosivih napona:

- za naponski nivo 400 kV: $U_{f,a} \geq 1175 \text{ kV}_{\text{tv}}$, $U_{f,s} \geq 850 \text{ kV}_{\text{tv}}$ i $U_{mf,s} \geq 1360 \text{ kV}_{\text{tv}}$,
- za naponski nivo 110 kV: $U_{f,a} \geq 450 \text{ kV}_{\text{tv}}$ i $U_{n,p} \geq 185 \text{ kV}_{\text{eff}}$,

u varijanti gromobranske zaštite samo štapnim gromobranima; u varijantama zaštite samo gromobranskim užadima na celoj površini ili gromobranskim užadima na višenaponskom nivou i štapnim gromobranima na niženaponskom nivou, zadovoljavajuća pouzdanost rada se postiže sa izolacijom sledećih standardizovanih podnosivih napona:

- za naponski nivo 400 kV: $U_{f,a} \geq 1050 \text{ kV}_{\text{tv}}$, $U_{f,s} \geq 850 \text{ kV}_{\text{tv}}$ i $U_{mf,s} \geq 1360 \text{ kV}_{\text{tv}}$,
- za naponski nivo 110 kV: $U_{f,a} \geq 450 \text{ kV}_{\text{tv}}$ i $U_{n,p} \geq 185 \text{ kV}_{\text{eff}}$.

Tabela 11.3.2.1. Prosečni intervali vremena između dva uzastopna ispada (T_i) i oštećenja (T_{ot}) spoljašnje izolacije tipičnih TS 400 kV/220 kV, TS 400 kV/110 kV i 220 kV/110 kV sa različitim varijantama gromobranske zaštite, uslovljeni svim atmosferskim i sklopnim prenaponima

Transformatorska stanica	Podnosivi naponi izolacije višeg ($U_{p,V}$) i nižeg ($U_{p,N}$) naponskog nivoa u TS $U_{p,V}/U_{p,N}$			Prosečni intervali vremena između dva uzastopna ispada (T_i) i oštećenja (T_{ot})					
	kratkotrajni naizmenični naponi industrijske frekvencije	sklopni udarni fazni naponi	atmosferski udarni fazni naponi	Štapni gromobrani na portalima TS		Štapni gromobrani na portalima niženaponskog nivoa i gromobranska užad na portalima višenaponskog nivoa TS		Gromobranska užad na portalima TS	
	kV_{eff}/kV_{eff}	kV_{iv}/kV_{iv}	kV_{iv}/kV_{iv}	T_i (god.)	T_{ot} (god.)	T_i (god.)	T_{ot} (god.)	T_i (god.)	T_{ot} (god.)
220 kV/110 kV	460/230		1050/550	>20	>200	>22	>220	>27	>270
	395/230		950/550	>20	>200	>22	>220	>27	>270
	360/230		850/550	>16	>160	>18	>180	>25	>250
	325/230		750/550	>14	>140	>16	>160	>21	>210
	325/185		750/450	>9	>90	>10	>100	>13	>130
	275/185		650/450	>6	>60	>7	>70	>9	>90
400 kV/110 kV	-/230	1050/-	1425/550	>19	>190	>36	>360	>52	>520
	-/230	950/-	1300/550	>16	>160	>36	>360	>52	>520
	-/230	950/-	1175/550	>14	>140	>30	>300	>48	>480
	-/185	850/-	1175/450	>11	>110	>15	>150	>23	>230
	-/185	850/-	1050/450	>9	>90	>14	>140	>20	>200
400 kV/220 kV	-/460	1050/-	1425/1050	>35	>350	>52	>520	>70	>700
	-/395	1050/-	1425/950	>32	>320	>48	>480	>70	>700
	-/360	950/-	1300/850	>26	>260	>40	>400	>55	>550
	-/325	950/-	1175/750	>17	>170	>28	>280	>43	>430
	-/325	850/-	1175/750	>16	>160	>26	>260	>40	>400
	-/275	850/-	1050/650	>11	>110	>15	>150	>20	>200

11.3.3. Parametri pouzdanosti izolacije energetskih transformatora 400 kV/220 kV, 400 kV/110 kV i 220 kV/110 kV pri delovanju sklopnih i atmosferskih prenapona

U delu 11.1.4. su utvrđeni parametri pouzdanosti izolacije energetskih transformatora 400 kV/220 kV, 400 kV/110 kV i 220 kV/110 kV pri delovanju atmosferskih prenapona i u delu 11.2.3. pri delovanju sklopnih prenapona u konkretnim TS i to: TS 400 kV/220 kV/110 kV "Niš 2", TS 400 kV/220 kV "Beograd 8", TS 400 kV/110 kV "Bor 2", TS 220 kV/110 kV "Požega" i TS 220 kV/110 kV "Beograd 3". Ustanovljeno je da je pouzdanost rada energetskih transformatora sa izolacijom namotaja i najnižih podnosivih sklopnih udarnih napona za mreže 400 kV, 220 kV i 110 kV veoma visoka pri delovanju sklopnih prenapona u razmatranim TS; osetno je veća u odnosu na pouzdanost rada pri delovanju atmosferskih prenapona. Parametri pouzdanosti rada energetskih transformatora zaštićenih metaloksidnim odvodnicima prenapona, utvrđeni pri delovanju atmosferskih prenapona, se prema tome praktično izjednačavaju sa parametrima pouzdanosti uslovljenim svim skupovima sklopnih i atmosferskih prenapona i dati su u tabelama 11.3.3.1., 11.3.3.2. i 11.3.3.3. za energetske transformatore 220 kV/110 kV, 400 kV/220 kV i 400 kV/110 kV.

Na osnovu analize parametara pouzdanosti rada energetskih transformatora 400 kV/220 kV, 400 kV/110 kV i 220 kV/110 kV, pri delovanju atmosferskih i sklopnih prenapona na izolaciju njihovih namotaja, može se konstatovati sledeće:

- Energetske transformatore treba obavezno štiti odvodnicima prenapona; transformatore sa najnižim standardizovanim podnosivim naponima štiti metaloksidnim odvodnicima prenapona bez iskrišta. Pri ovome potrebno je voditi računa da se obezbedi što je moguće kraća putanja po faznom provodniku između provodnih izolatora transformatora i odvodnika prenapona, kao i što kraće veze uzemljenja između mase transformatora i odvodnika prenapona. Time se postiže veća efikasnost zaštite odvodnicima prenapona.
- Gromobranska zaštita ima izuzetno značajnu ulogu u zaštiti izolacije namotaja transformatora. Gromobranska užad sa obe strane portala iznad transformatora su od posmatranih najbolje i preporučljivo rešenje.
- Najuticajniji skup prenapona na izolaciji namotaja transformatora je skup prenapona koji generišu udari groma u portal iznad transformatora ili u gromobransku užad sa obe strane portala. Njegov uticaj se može efikasno umanjiti izborom izolatorskih lanaca portala niženaponskog nivoa sa višim podnosivim atmosferskim udarnim naponima (izolatorski lanci sa većim brojem članaka). Time se smanjuje i mogućnost proboja podužne izolacije namotaja transformatora.
- Energetski transformatori 400 kV/220 kV, 400 kV/110 kV i 220kV/110 kV sa izolacijom i najviših standardizovanih podnosivih napona nemaju zadovoljavajuću pouzdanost rada u TS bez gromobranske zaštite ili zaštićenih samo štapnim gromobranima ili gromobranskim užadima na portalima višenaponskog nivoa (gromobranska užad se završavaju na portalu iznad transformatora) i štapnim gromobranima na portalima niženaponskog nivoa TS. Produženjem gromobranskih užadi od portala iznad transformatora do portala niženaponskog dela TS znatno se povećava pouzdanost rada transformatora pri delovanju atmosferskih prenapona.
- U TS zaštićenim gromobranskim užadima na celoj površini, energetski transformatori 400 kV/220 kV i 220 kV/110 kV, uz efikasnu prenaponsku zaštitu, sa izolacijom i najnižih standardizovanih podnosivih napona imaju zadovoljavajuću pouzdanost ili su malo niži od granice zadovoljavajuće pouzdanosti. Energetski transformatori 400 kV/110 kV, u istim TS, nemaju zadovoljavajuću pouzdanost sa izolacijom najnižih standardizovanih podnosivih napona. Izborom izolatorskih lanaca niženaponskog nivoa na portalu sa višim podnosivim naponima, jednakim podnosivim naponima izolatorskih lanaca višenaponskog nivoa na istom portalu, postaje prihvatljiva pouzdanost rada energetskih transformatora 400 kV/110 kV i sa izolacijom najnižih standardizovanih podnosivih napona.

Tabela 11.3.3.1. Prosečni intervali vremena (T_{ot}) između dva uzastopna proboja izolacije namotaja transformatora 220 kV/110 kV zaštićenog metaloksidnim odvodnicima prenapona na kraćem (KR) i dužem (DR) rastojanju odvodnik prenapona-transformator po faznom provodniku, uslovljeni svim skupovima atmosferskih i sklopnih prenapona za različite varijante gromobranske zaštite TS

Podnosivi naponi izolacije višeg ($U_{p,V}$) i nižeg ($U_{p,N}$) naponskog nivoa u TS $U_{p,V}/U_{p,N}$				Prosečni intervali vremena (T_{ot}) između dva uzastopna proboja izolacije namotaja transformatora 220 kV/110 kV za različite varijante gromobranske zaštite TS					
kratkotrajni naizmenični naponi industrijske frekvencije		atmosferski udarni fazni naponi		Štapni gromobrani na portalima TS		Štapni gromobrani na portalima niženaponskog nivoa i gromobranska užad na portalima višenaponskog nivoa TS		Gromobranska užad na portalima TS	
izolatorski lanci portala iznad transformatora	izolatorski lanci TS i izolacija namotaja transformatora	izolatorski lanci portala iznad transformatora	izolatorski lanci TS i izolacija namotaja transformatora	T_{ot}		T_{ot}		T_{ot}	
kV _{eff} /kV _{eff}	kV _{eff} /kV _{eff}	kV _{iv} /kV _{iv}	kV _{iv} /kV _{iv}	KR (god.)	DR (god.)	KR (god.)	DR (god.)	KR (god.)	DR (god.)
460/230		1050/550		>250	>220	>330	>280	>2100	>1600
395/230		950/550		>230	>190	>330	>280	>2100	>1600
360/230		850/550		>190	>170	>330	>270	>1900	>1500
325/230		750/550		>160	>140	>300	>260	>1300	>1100
325/185		750/450		>110	>100	>160	>140	>690	>510
275/185		650/450		>95	>85	>150	>130	>530	>390
460/460	460/230	1050/1050	1050/550	>280	>240	>360	>300	>2300	>1800
395/395	395/230	950/950	950/550	>250	>210	>360	>300	>2300	>1800
360/360	360/230	850/850	850/550	>200	>180	>350	>290	>2000	>1600
325/325	325/230	750/750	750/550	>170	>150	>320	>270	>1300	>1200
325/325	325/185	750/750	750/450	>120	>110	>170	>150	>750	>550
275/275	275/185	650/650	650/450	>98	>90	>160	>140	>560	>410

Tabela 11.3.3.2. Prosečni intervali vremena (T_{ot}) između dva uzastopna proboja izolacije namotaja transformatora 400 kV/110 kV zaštićenog metaloksidnim odvodnicima prenapona na kraćem (KR) i dužem (DR) rastojanju odvodnik prenapona-transformator po faznom provodniku, uslovljeni svim skupovima atmosferskih i sklopnih prenapona za različite varijante gromobranske zaštite TS

Podnosivi naponi izolacije višeg ($U_{p,V}$) i nižeg ($U_{p,N}$) naponskog nivoa u TS						Prosečni intervali vremena (T_{ot}) između dva uzastopna proboja izolacije namotaja transformatora 400 kV/110 kV za različite varijante gromobranske zaštite TS					
kratkotrajni naizmenični naponi industrijske frekvencije		$U_{p,V}/U_{p,N}$				Štapni gromobrani na portalima TS		Štapni gromobrani na portalima niženaponskog nivoa i gromobranska užad na portalima višenaponskog nivoa TS		Gromobranska užad na portalima TS	
		sklopni udarni fazni naponi		atmosferski udarni fazni naponi							
izolatorski lanci portala iznad transformatora	izolatorski lanci TS i izolacija namotaja transformatora	izolatorski lanci portala iznad transformatora	izolatorski lanci TS i izolacija namotaja transformatora	izolatorski lanci portala iznad transformatora	izolatorski lanci TS i izolacija namotaja transformatora	T_{ot}		T_{ot}		T_{ot}	
kV _{eff} /kV _{eff}	kV _{eff} /kV _{eff}	kV _{iv} /kV _{iv}	kV _{iv} /kV _{iv}	kV _{iv} /kV _{iv}	kV _{iv} /kV _{iv}	KR	DR	KR	DR	KR	DR
						(god.)	(god.)	(god.)	(god.)	(god.)	(god.)
-/230		1050/-		1425/550		>160	>140	>240	>200	>1000	>950
-/230		950/-		1300/550		>150	>130	>240	>200	>1000	>950
-/230		950/-		1175/550		>130	>110	>240	>200	>1000	>950
-/185		850/-		1175/450		>90	>80	>120	>110	>420	>330
-/185		850/-		1050/450		>80	>74	>110	>100	>360	>280
-/-	-/230	1050/1050	1050/-	1425/1425	1425/550	>240	>210	>350	>300	>2100	>1800
-/-	-/230	950/950	950/-	1300/1300	1300/550	>210	>190	>350	>300	>2100	>1800
-/-	-/230	950/950	950/-	1175/1175	1175/550	>170	>150	>350	>300	>2100	>1800
-/-	-/185	850/850	850/-	1175/1175	1175/450	>110	>100	>180	>160	>740	>580
-/-	-/185	850/850	850/-	1050/1050	1050/450	>100	>95	>160	>150	>560	>450

Tabela 11.3.3.3. Prosečni intervali vremena (T_{ot}) između dva uzastopna proboja izolacije namotaja transformatora 400 kV/220 kV zaštićenog metaloksidnim odvodnicima prenapona na kraćem (KR) i dužem (DR) rastojanju odvodnik prenapona-transformator po faznom provodniku, uslovljeni svim skupovima atmosferskih i sklopnih prenapona za različite varijante gromobranske zaštite TS

Podnosivi naponi izolacije višeg ($U_{p,V}$) i nižeg ($U_{p,N}$) naponskog nivoa u TS						Prosečni intervali vremena (T_{ot}) između dva uzastopna proboja izolacije namotaja transformatora 400 kV/220 kV za različite varijante gromobranske zaštite TS					
kratkotrajni naizmenični naponi industrijske frekvencije		$U_{p,V}/U_{p,N}$				Štapni gromobrani na portalima TS		Štapni gromobrani na portalima niženaponskog nivoa i gromobranska užad na portalima višenaponskog nivoa TS		Gromobranska užad na portalima TS	
		sklopni udarni fazni naponi		atmosferski udarni fazni naponi							
izolatorski lanci portala iznad transformatora	izolatorski lanci TS i izolacija namotaja transformatora	izolatorski lanci portala iznad transformatora	izolatorski lanci TS i izolacija namotaja transformatora	izolatorski lanci portala iznad transformatora	izolatorski lanci TS i izolacija namotaja transformatora	T_{ot}		T_{ot}		T_{ot}	
kV _{eff} /kV _{eff}	kV _{eff} /kV _{eff}	kV _{IV} /kV _{IV}	kV _{IV} /kV _{IV}	kV _{IV} /kV _{IV}	kV _{IV} /kV _{IV}	KR	DR	KR	DR	KR	DR
						(god.)	(god.)	(god.)	(god.)	(god.)	(god.)
-/460		1050/-		1425/1050		>420	>360	>890	>780	>4200	>4100
-/395		1050/-		1425/950		>320	>290	>570	>520	>3800	>3700
-/360		950/-		1300/850		>200	>180	>390	>340	>2900	>2700
-/325		950/-		1175/750		>130	>110	>250	>210	>1400	>1100
-/325		850/-		1175/750		>130	>110	>250	>210	>1400	>1100
-/275		850/-		1050/650		>96	>85	>150	>120	>610	>460
-/-	-/460	1050/1050	1050/-	1425/1425	1425/1050	>490	>430	>1000	>900	>4200	>4000
-/-	-/395	1050/1050	1050/-	1425/1425	1425/950	>370	>320	>660	>580	>4200	>4000
-/-	-/360	950/950	950/-	1300/1300	1300/850	>230	>200	>440	>370	>3500	>3200
-/-	-/325	950/950	950/-	1175/1175	1175/750	>150	>130	>280	>250	>1700	>1400
-/-	-/325	850/850	850/-	1175/1175	1175/750	>150	>130	>280	>250	>1700	>1400
-/-	-/275	850/850	850/-	1050/1050	1050/650	>110	>95	>170	>140	>680	>530

12. ZAKLJUČCI

Na osnovu prethodno izloženog može se zaključiti sledeće:

1. U radu je prikazana originalna metoda izračunavanja rizika preskoka, odnosno proboja sistema izolacija na bazi izračunatih verovatnoća preskoka, odnosno proboja jediničnih izolacija pri delovanju prenapona različite prirode. Metoda se može koristiti za faznu, međufaznu ili poduznu izolaciju pod uslovom da se poznaju krive efekta svake razmatrane jedinične izolacije. Na osnovu prenapona koji se javljaju na jediničnim izolacijama pri pojavi jednog uzročnog događaja, iz krivih efekta razmatranih jediničnih izolacija se određuju verovatnoće preskoka, odnosno proboja, a na osnovu njih verovatnoća preskoka, odnosno proboja sistema izolacija. Rizik preskoka, odnosno proboja razmatranog sistema izolacija predstavlja srednju vrednost verovatnoća preskoka pri pojavi istovrsnih uzročnih događaja. Metode za izračunavanje rizika preskoka preko gustina raspodela prenapona, koje se sreću u svetskoj literaturi, su prihvatljive samo za jedinične izolacione konstrukcije uz pretpostavku pojave prenapona istih oblika ili strmina. Za sistem sa više izolacionih konstrukcija izračunavanje rizika preskoka preko gustina raspodela prenapona istih oblika i strmina, pri delovanju istovrsnih uzročnih događaja, može dovesti do znatnih grešaka; za slučaj pojave prenapona različitih oblika ili strmina pri istovrsnim uzročnim događajima rizik se ne može utvrditi.
- Verovatnoće preskoka (proboja) jedinične izolacije ili sistema jediničnih izolacija pri delovanju istovrsnih uzročnih događaja mogu se posmatrati kao nezavisne slučajne veličine. Njihovom statističkom obradom omogućava se sveobuhvatnije sagledavanje pouzdanosti razmatranih jediničnih izolacija ili sistema jediničnih izolacija.
- Prezentirana metoda za izračunavanje rizika omogućava utvrđivanje rizika preskoka (proboja) na odabranoj jediničnoj izolaciji u sistemu složene izolacije uvažavajući preskoke (proboje) na ostalim jediničnim izolacijama.
2. Uvođenjem krivih efekta izolacije za prenapone određenih strmina predstavlja doprinos, jer se ostvaruje mogućnost pouzdanijeg utvrđivanja verovatnoće preskoka. Krive efekta za prenapone određenih oblika, koje se mogu naći u literaturi, ne opisuju u potpunosti verovatnoće preskoka (proboja) izolacije, a voltsekundne karakteristike daju podatke samo o preskočnim naponima određene strmine pri kojima se preskok na izolaciji može očekivati u 50% slučajeva.
 3. Metoda dekompozicije rizika preskoka (proboja) sistema izolacija je originalna. Omogućava da se izborom željenih odnosa utvrde rizici podsistema, odnosno rizici jediničnih izolacija. Utvrđivanjem rizika jedinične izolacije omogućeno je utvrđivanje parametara njene krive efekta za ustanovljene prenapone.
 4. Doprinos predstavlja i utvrđivanje, osim rizika preskoka (proboja) sistema izolacija, ostalih parametara pouzdanosti: očekivanih godišnjih brojeva preskoka, ispada i oštećenja i prosečnih intervala vremena između dva uzastopna preskoka, ispada i oštećenja izolacije nadzemnih vodova, transformatorskih stanica i transformatora. Prvi put kod nas su predložene brojne vrednosti parametara pouzdanosti rada objekata elektroenergetskog sistema EPS polazeći od zahtevane, prethodno definisane, pouzdanosti njihovog rada pri ukupnom delovanju prenapona u životnom veku. Značajan doprinos predstavlja i teorijsko obrazloženje izbora vrednosti pokazatelja pouzdanosti za razmatrane objekte.
 5. Pristup utvrđivanju karakteristika jediničnih izolacionih konstrukcija sistema, pri delovanju različitih vrsta prenapona, kada su dati pojedini parametri pouzdanosti sistema, predstavlja značajan doprinos. Na osnovu zadatih očekivanih godišnjih brojeva preskoka, ispada ili oštećenja, ili na osnovu zadatih prosečnih intervala vremena između dva uzastopna preskoka, ispada ili oštećenja sistema izolacija i željenih odnosa između rizika preskoka (proboja) pri

delovanju različnih uzročnih događaja, utvrđuju se rizici preskoka (proboja) sistema izolacija za razmatrane događaje, na osnovu njih rizici podsistema izolacija, odnosno rizici jediničnih izolacija. Iz rizika jediničnih izolacionih konstrukcija utvrđuju se karakteristike njihove izolacije i vrši izbor izolacije sistema.

6. Model za utvrđivanje pouzdanosti rada transformatora sa uvažavanjem starenja njegove izolacije je originalan. Omogućava praćenje pouzdanosti rada transformatora u toku njegovog životnog veka. Prihvatljiv je za bilo koju promenu dielektrične čvrstoće izolacije namotaja transformatora u toku vremena. Isti model se može primetiti i na ostale objekte kod kojih dolazi do promene stanja izolacije u toku vremena.
7. Prezentirana metoda za utvrđivanje rizika preskoka (proboja) je primenjena za izračunavanje rizika za konkretne objekte elektroenergetskog sistema EPS naponskih nivoa 400 kV, 220 kV i 110 kV. Ustanovljeni su rizici preskoka (proboja) izolacije vodova napona 400 kV, 220 kV i 110 kV, transformatorskih stanica TS 400 kV/220 kV, TS 400 kV/110 kV i TS 220 kV/110 kV i energetskih transformatora 400 kV/220 kV, 400 kV/110 kV i 220 kV/110 kV. Na osnovu rizika preskoka (proboja) utvrđeni su parametri pouzdanosti za sve razmatrane objekte. To je urađeno za postojeću izolaciju objekata i za sve ostale izolacije koje su standardima predviđene za najviše napone opreme 420 kV, 245 kV i 123 kV. Izvršena je analiza mogućnosti sniženja izolacije i ustanovljeno je da se izolacije sa najnižim standardizovanim podnosivim naponima sa zadovoljavajućom pouzdanošću mogu koristiti u elektroenergetskom sistemu EPS. Prikazana metoda određivanja rizika preskoka na spoljašnjoj izolaciji, uvažavajući njen rad u suvoj i vlažnoj atmosferi, uticaj nadmorske visine i starenja, predstavlja doprinos. Takođe, doprinos predstavlja i analiza pouzdanosti rada transformatora istovremeno posmatrajući rizik proboja izolacije višeg i nižeg naponskog nivoa.
8. Prikazani model utvrđivanja parametara pouzdanosti objekata pri ukupom delovanju atmosferskih i sklopnih prenapona je originalan. Ostvaruje mogućnost međusobnog povezivanja parametara pouzdanosti pri delovanju atmosferskih prenapona sa parametrima pouzdanosti pri delovanju sklopnih prenapona. Model, takođe, omogućuje da se utvrde pored postojećih i parametri pouzdanosti za snižene izolacione nivoe objekata polazeći od ulaznih podataka za uzročne događaje koji su vezani za postojeći nivo izolacije.
9. Analizom parametara pouzdanosti konkretnih objekata pronađena su i nova rešenja za povećanje pouzdanosti njihovog rada. Tako npr. pouzdanost energetskih transformatora pri delovanju atmosferskih prenapona se znatno povećava kada se na portalu iznad transformatora izolatorski lanci nižeg naponskog nivoa izjednače sa brojem članaka u lancu izolatora višeg naponskog nivoa. Takođe, postavljanje gromobranskih užadi sa obe strane portala iznad transformatora znatno doprinosi većoj pouzdanosti njegovog rada pri delovanju atmosferskih prenapona.
10. Analiza parametara pouzdanosti objekata 400 kV, 220 kV i 110 kV za standardizovane podnosive napone pri delovanju atmosferskih i sklopnih prenapona je pokazala da postoje velike rezerve u postojećoj izolaciji i da se za nove ili revitalizovane objekte može koristiti izolacija znatno nižih naponskih nivoa od postojećih.

Literatura:

1. D.E.Artemev, N.N.Tihodeev, S.S.Šur:
Statističeskie osnovi vibora izoljacii linij elektropredači
"Energija", Moskva 1965 (na ruskom).
2. A.I.Dolginov:
Tehnika visokih naprjaženij u elektroenergetike
"Energija", Moskva 1968 (na ruskom).
3. N.V.Smironov, I.V.Dunin - Barkovskij:
Kurs teorij verovatnošej i matematičeskoj statistiki dlja tehničeskih priloženij
"Nouka", Moskva 1969 (na ruskom).
4. M.V.Kostenko:
Tehnika visokih naprjaženij
"Viššaja škola", Moskva 1973 (na ruskom).
5. S.Vukadinović:
Elementi teorije verovatnoće i matematičke statistike
Beograd 1973.
6. H.Anis, R.P.Comca:
Bivariate probability of breakdown under switching surges
IEEE PAS 3, may/june 1973, 877-885.
7. Z.Zdravković, N.Petković, M.Mujdžić, P.Vukelja, S.Stojanović:
Komutacioni prenaponi na elektroprenosu 400 kV Đerdap-Beograd.
"Elektroprivreda", br.1, 1974, Beograd.
8. C.Dubanton, G.Le Roy:
Research into a practical method to determine the probability of failure of an EHV transmission line
IEEE Trans Power Appar. and Syst., 1975, 94, No 6, 1954-1961.
9. J.B.Šor:
Statističke metode analize i kontrole kvaliteta i pouzdanosti (prevod sa ruskog)
Beograd 1975.
10. D.V.Razevig:
Tehnika visokih naprjaženij
"Energija", Moskva 1976 (na ruskom).
11. J.Elovaara:
Risk of failure determination of overhead line phase-to-earth insulation under switching surges
Electra, No 56, Januaru 1978, 69-87.

12. K.Berger:
Actual knowledge on lightning research and lightning protection
15th European Conference on Lightning Protection, Uppsala, June 23-29, 1979.
13. P.Vukelja sa saradnicima:
Udarni koeficijenti komutacionih prenapona na elektroprenosu 400 kV Niš-Kragujevac
15.savetovanje elektroenergetičara Jugoslavije, Beograd, 1981.
14. Z.Zdravković, P.Vukelja, M.Cvetković, R.Naumov, S.Stevanović, N.Petković, N.Jokanović,
M.Gavrić, P.Budišin, D.Filipović:
Koordinacija izolacije 400 kV-ne mreže SR Srbije
Studija br.383V26, urađena za ZEP, Institut "Nikola Tesla", Beograd 1983.
15. IEEE WG on Lightning Performance of Transmission Lines A Simple Method for Estimating
Lightning Performance of Transmission Lines
Trans IEEE, Vol.PAS-104 (1985), pp 919-932.
16. G.N.Aleksandrov, A.F.Sorokin:
Ocenka parametara razrada molnii pri prjamom poraženii provodov (trosov)
"Energetika", No 10, 1985 (na ruskom).
17. P.Vukelja, M.Šale, T.Vujnovac:
Komutacioni prenaponi u sistemu 400 kV TE "Nikola Tesla B" - RP "Mladost"-TS
"Ernestinovo"
17.Savetovanje elektroenergetičara Jugoslavije, Struga, 1985.
18. Z.Zdravković, P.Vukelja, N.Jokanović:
Proračuni rizika i očekivanog broja preskoka na visokonaponskoj izolaciji elektorenergetskog
sistema
Zbornik radova Elektrotehničkog Instituta "Nikola Tesla", Beograd 1985.
19. Z.Zdravković, P.Vukelja, N.Jokanović:
Proračun rizika i očekivanog broja preskoka na visokonaponskoj izolaciji elektroenergetskog
sistema
17.Savetovanje elektroenergetičara Jugoslavije, Struga 1985.
20. Z.Zdravković, P.Vukelja, N.Jokanović, M.Gavrić:
Rizik i očekivani broj preskoka pri udaru groma u dalekovod i postrojenje
17.Savetovanje elektroenergetičara Jugoslavije, Struga 1985.
21. Z.Zdravković, P.Vukelja, N.Jokanović, R.Naumov, M.Vučinić, D.Branković, M.Gavrić:
Duboko ograničenje prenapona u mrežama visokog napona
Studija br.328610, urađeno za ZEP, Institut "Nikola Tesla", Beograd 1986.
22. V.V.Bazutkin, V.P.Larinov, J.S.Pintalji:
Tehnika visokih naprjaženij
"Energoatomizdat", Moskva 1986 (na ruskom).

23. P.Vukelja, R.Naumov, N.Jokanović, A.Sekso:
Sklopni prenaponi na elektroprenosu 400 kV Konjsko-Obrovac-Melina
"Elektroprivreda", br.1-2, 1987.
24. Z.Zdravković, P.Vukelja, N.Jokanović:
Efikasnost nekih mera u ograničavanju sklopnih prenapona
18.Savetovanje elektroenergetičara Jugoslavije, Budva 1987.
25. Z.Zdravković, P.Vukelja, M.Savić i dr.:
Tehnički i ekonomski aspekti izgradnje i eksploatacije dalekovoda sa redukovanom
gromobranskom zaštitom
Studija br.328801, Institut "Nikola Tesla", Beograd 1988.
26. Z.Zdravković, P.Vukelja, M.Vučinić, R.Naumov, S.Stevanović, D.Filipović, N.Jokanović:
Sklopni prenaponi u mreži 400 kV Jugoslavije
"Elektroprivreda", br.7-8, Beograd 1988.
27. Z.Zdravković, P.Vukelja:
Rizik preskoka od sklopnih prenapona na dalekovodima 400 kV Jugoslavije
11.Savetovanje o prenosu električne energije u SFRJ, Dubrovnik 1988.
28. Z.Zdravković, P.Vukelja, M.Vučinić, R.Naumov, P.Budišin, S.Stevanović, D.Filipović,
N.Jokanović:
Sklopni fazni i međufazni prenaponi u transformatorskim stanicama 400 kV i rizici preskoka
Simpozijum o prenaponima i izolaciji 400 kV mreže Jugoslavije, Dubrovnik, novembar 1988.
29. Z.Zdravković, P.Vukelja:
Ograničenje sklopnih prenapona na nadzemnim vodovima napona 400 kV
Simpozijum o prenaponima i izolaciji 400 kV mreže Jugoslavije, Dubrovnik, novembar 1988.
30. Z.Zdravković, P.Vukelja, M.Vučinić, D.Filipović, N.Jokanović, M.Gavrić, D.Hrvić:
Atmosferski prenaponi na elektroenergetskim objektima napona 400 kV, rizici preskoka i
preskoci za različite stupnjeve izolacije
Simpozijum o prenaponima i izolaciji 400 kV mreže Jugoslavije, Dubrovnik, novembar 1988.
31. P.Vukelja, M.Vučinić, A.Sekso, T.Vujnovac:
Sklopni prenaponi u TS 400 kV/110 kV "Ernestinovo" i na dalekovodu 400 kV "Ernestinovo-
Mladost"
19.Savetovanje elektroenergetičara Jugoslavije, Bled, 1989.
32. Z.Zdravković, P.Vukelja:
Istraživanje sklopnih prenapona na dalekovodima 400 kV
19.Savetovanje elektroenergetičara Jugoslavije, Bled 1989.
33. Z.Zdravković, P.Vukelja, M.Vučinić, R.Naumov, S.Stevanović, D.Filipović, N.Jokanović:
Sklopni fazni i međufazni prenaponi na dalekovodima 400 kV i rizici preskoka
"Elektroprivreda", br.3-4, 1989.
34. Z.Zdravković, P.Vukelja, M.Savić, M.Vučinić, R.Naumov, D.Filipović, N.Jokanović, D.Hrvić:

Konkretna rešenja sniženja stupnja izolacije u mrežama 400 kV i 110 kV i utvrđivanje tehničke i ekonomske opravdanosti

Studija br.328906, 119 strana, urađena za ZEP, Institut "Nikola Tesla", Beograd 1989.

35. Z.Zdravković, P.Vukelja, M.Savić:
 Redukcija gromobranske zaštite nadzemnih vodova visokih napona
 19.Savetovanje elektroenergetičara Jugoslavije, Bled, 1989.
36. Z.Zdravković, P.Vukelja:
 Investigation of switching overvoltages on 400 kV transmission lines
 CIGRE, SC-22, Transmission lines open conference, Sarajevo, oktobar 11, 1989.
37. V.Haušild, V.Moš:
 Statistika dlja elektrotehnikov v priloženii k tehnike visokih napraženij
 "Energoatomizdat", Leningrad 1989 (na ruskom).
38. Z.Zdravković, P.Vukelja:
 Uticaj zaštitne karakteristike odvodnika prenapona na rizik i druge parametre pouzdanosti nadzemnog voda
 4.Hoflerjev dan na EIMV, Ljubljana, 13-14 novembar 1990.
 (Četvrto međunarodno srećanje strokovnjakov s područja visokonapetostne tehnike).
39. Z.Zdravković, P.Vukelja:
 Ograničenje atmosferskih prenapona odvodnicima prenapona različitih zaštitnih karakteristika
 JUKO CIGRE STK 33, JUGEL, Kolokvijum, Sarajevo, 1990.
40. Z.Zdravković, P.Vukelja:
 Ograničenje sklopnih prenapona na nadzemnim vodovima 400 kV primenom odvodnika prenapona
 JUKO CIGRE STK 33, JUGEL, Kolokvijum, Sarajevo, 1990.
41. Z.Zdravković, P.Vukelja:
 Uperedna istraživanja metal-oksidnih rezistora strane i domaće proizvodnje
 JUKO CIGRE STK 33, JUGEL, Kolokvijum, Sarajevo 1990.
42. Z.Zdravković, P.Vukelja:
 Električne karakteristike metal-oksidnih rezistora nelinearne otpornosti
 20.Savetovanje elektroenergetičara Jugoslavije, Neum, 22. - 26. april 1991.
43. IEC 99-1, 1991 Surge arresters - Part 1: Non-linear resistor type gapped surge arresters for a.c. systems.
44. JUS N.F1.011, 1991, Izolatori od keramičkih materijala ili stakla za napone iznad 1000 V.
45. P.Vukelja, D.Filipović, S.Stevanović, M.Vučinić,:
 Rizici preskoka na nadzemnom vodu 400 kV "Tumbri-Mladost"
 Studija br.329204, urađena za EPS, Institut "Nikola Tesla", Beograd, 1992.

46. P.Vukelja, R.Naumov, Z.Zdravković, G.Drobnjak, D.Hrvić, S.Stevanović:
Sprovođenje istraživanja prenaponskih pojava u postrojenju TS 220 kV/110 kV/35 kV "Požega"
Studija br.329207, urađena za EPS, Institut "Nikola Tesla", 1992.
47. Z.Zdravković, P.Vukelja:
Switching overvoltages and risk of flashover on Yugoslav 400 kV transmission lines
IEE PROCEEDINGS-C, Vol.139, No.2, march, 1992.
48. IEC 71-1, 1993, Insulation co-ordination-Part 1: Definitions, principles and rules.
49. G.N.Aleksandrov:
Projektovanje linij elektroperedaci sverhvisokogo naprjaženija
"Energoatomizdat", Sankt-Peterburg, 1993 (na ruskom).
50. P.Vukelja, R.Naumov, G.Drobnjak, D.Hrvić, S.Banić, Z.Nedeljković:
Prenaponi u TS 220/110/35 kV "Požega"
"Elektroprivreda", No. 1-12, 1994, str. 72-81.
51. Z.Zdravković, P.Vukelja, R.Naumov, M.Savić:
Reduction of lightning protection of HV overhead lines.
9th International Power System Conference, St.Peterburg, 1-3 July 1994.
52. Z.Zdravković, P.Vukelja, G.Drobnjak, J.Mrvić:
Stresses in gapless metal oxide surge arresters.
9th International Power System Conference, St.Peterburg, 1-3 July 1994.
53. JUS IEC 99-4, 1995, Odvodnici prenapona - Deo 4: Metaloksidni odvodnici prenapona bez iskrišta za mreže naizmjenične struje.
54. Z.Zdravković, P.Vukelja:
Overvoltages by switching 400 kV, 220 kV and 110 kV circuit breakers on former Yugoslav
power system
International Symposium "Energetic Systems in Swith-Eastern Europe",
Ohrid, Macedonia, 21-23 september 1995.
55. Z.Zdravković, P.Vukelja, J.Mrvić:
Uticaj parametara groma i stuba na napon stuba pri udaru groma
"Elektroprivreda", br. 4, 1995, 76-86.
56. P.Vukelja, J.Mrvić, G.Drobnjak:
Uticaj modela stubova nadzemnih vodova na rizik povratnog preskoka pri udaru groma
"Elektroprivreda", br. 4, 1996, 68-75.
57. Z.Zdravković, P.Vukelja, G.Drobnjak, J.Mrvić:
Izolacija energetskih transformatora napona 400 kV/110 kV
Savetovanje "Transformatori u elektroenergetici", Beograd 1996, 231-240.



Прилог 1.

Изјава о ауторству

Потписани-а Вукеља, Петар И.

Изјављујем

да је докторска дисертација под насловом

Анализа могућности снижења изолационих нивоа објеката високих напона 400 kV, 220 kV и 110 kV применом Монте Карло симулације

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

Потпис

У Београду, 3.02.2014

Petar Vukelja

Прилог 2.

Изјава о коришћењу

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

Анализа могућности снижења изолационих нивоа објеката високих напона 400 kV, 220 kV и 110 kV применом Монте Карло симулације

која је моје ауторско дело.

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

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

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

(Молимо да заокружите само једну од шест понуђених лиценци, кратак опис лиценци дат је на полеђини листа).

Потпис

У Београду, 3. 02. 2014

Peter Dulic