
PRIJELAZNE POJAVE I ELEKTROMAGNETSKA KOMPATIBILNOST

Prof.dr.sc. Ivo Uglešić, dipl.ing.

Dr.sc. Viktor Milardić, dipl.ing.

Božidar Filipović-Grčić, dipl.ing.

Mr.sc. Milivoj Mandić, dipl.ing.

Boško Milešević, dipl.ing.

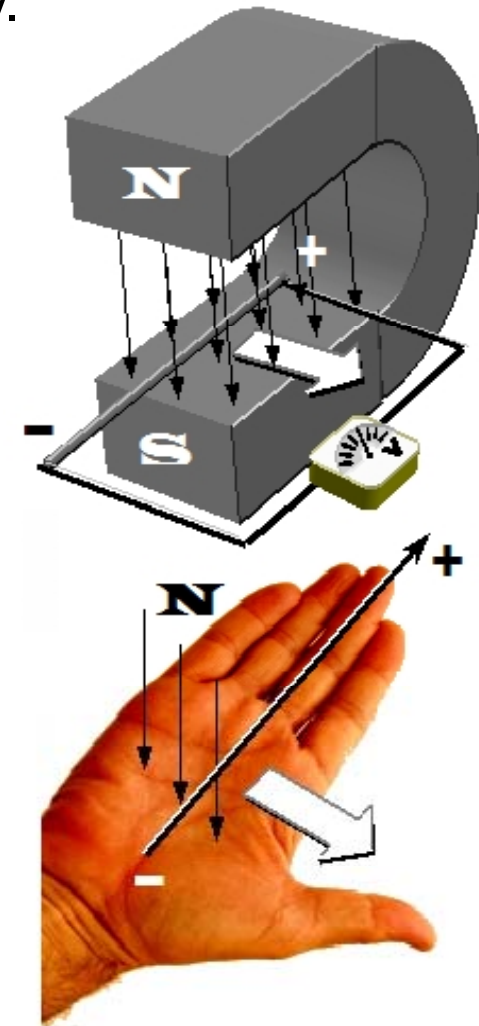
<http://www.fer.hr/predmet/ppek>

Elektromagnetska indukcija

- ❑ **Elektromagnetska indukcija je pojava da se u vodiču koji u magnetskom polju ima komponentu brzine okomitu na smjer magnetskog polja ("siječe" magnetske silnice) inducira napon.**
- ❑ **Elektromagnetsku indukciju otkrio je Michael Faraday.**

$$U = - \frac{d\Phi}{dt}$$

- ❑ **Taj se izraz zove Faradayev zakon indukcije. U izrazu se pojavljuje predznak minus, on je povezan sa smjerom inducirano napona.**
- ❑ **Smjer je takav da inducirana struja što nastaje zbog inducirano napona, stvara magnetno polje koje djeluje suprotno promjeni magnetskoga toka, tj. nastoji spriječiti gibanje zbog kojeg je nastala inducirana struja.**
- ❑ **To pravilo za smjer inducirane struje zove se Lenzovo pravilo.**

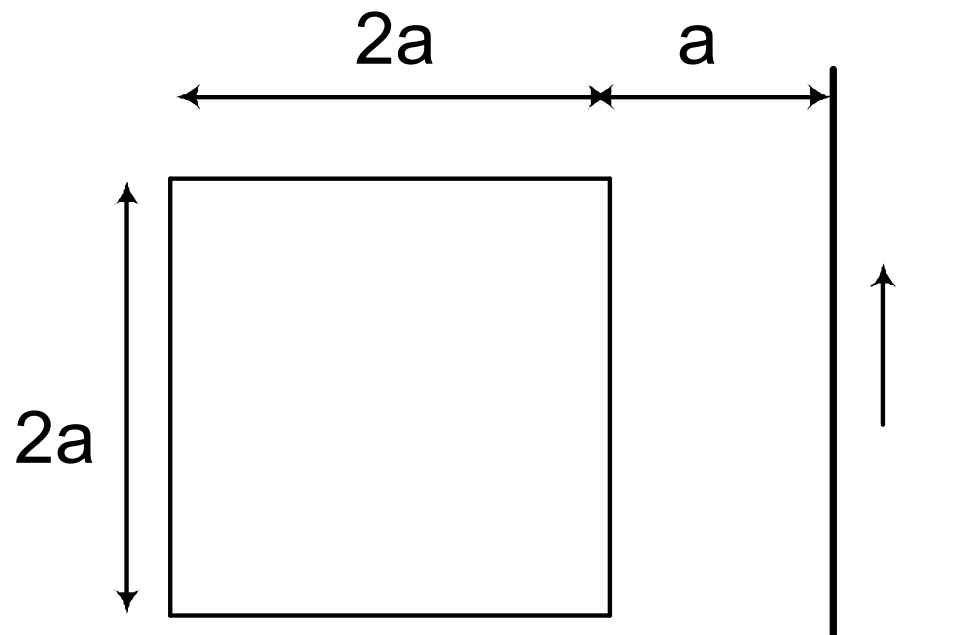


Primjer:

Odredite magnetski tok koji se zatvara kroz zatvorenu petlju prikazanu na slici.

Zadano:

- $a = 1$ [cm]
- $I = 10$ [A]



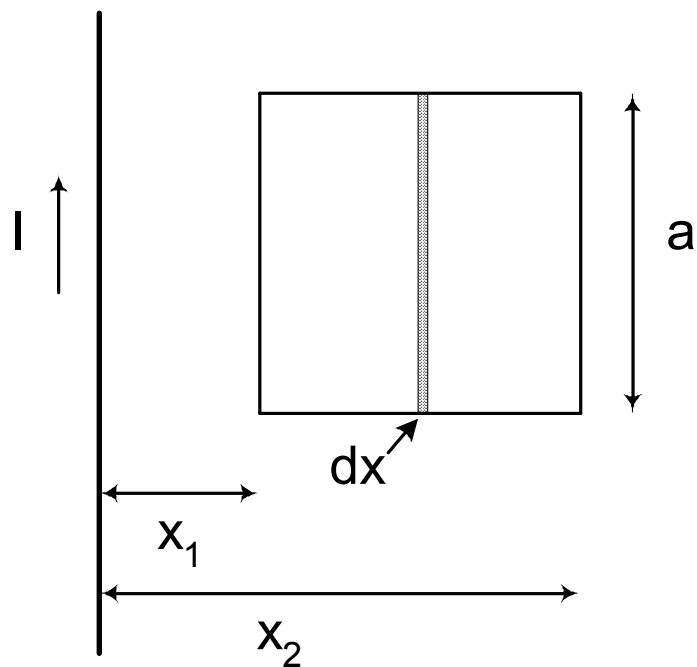
Rješenje primjera:

- Magnetski tok je skalarna veličina kojom se opisuje magnetsko polje i definiran je kao:

$$\Phi = \vec{B} \cdot \vec{S}$$

$$\Phi = \oiint_S \vec{B} \cdot d\vec{S}$$

- Primjer, tok kroz zatvorenu petlju:



$$\Phi = \oiint_S \vec{B}(x) \cdot d\vec{S} = \int_{x_1}^{x_2} B(x) \cdot a \cdot dx$$

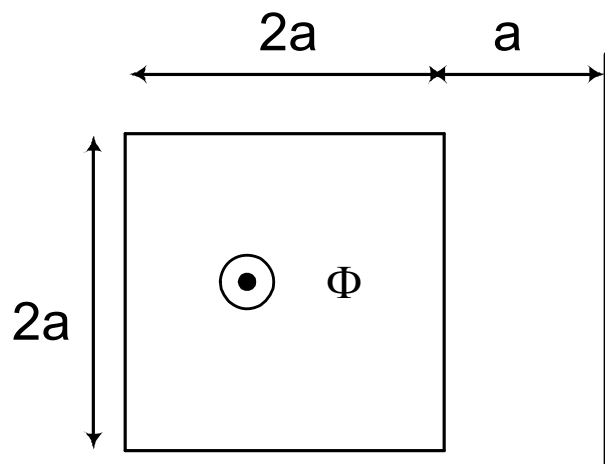
$$\Phi = \int_{x_1}^{x_2} \mu_0 \cdot \frac{I}{2 \cdot \pi \cdot x} \cdot a \cdot dx = \mu_0 \cdot \frac{I \cdot a}{2 \cdot \pi} \int_{x_1}^{x_2} \frac{dx}{x}$$

$$\Phi = \mu_0 \cdot \frac{I \cdot a}{2 \cdot \pi} \cdot \ln x \Big|_{x_1}^{x_2}$$

$$\Phi = \mu_0 \cdot \frac{I \cdot a}{2 \cdot \pi} \cdot \ln \frac{x_2}{x_1}$$

Rješenje primjera:

- Smjer magnetskog toka određuje se pravilom desnog vijka:



Palac pokazuje smjer struje kroz vodič i tada prsti određuju smjer magnetskog toka.

- Iznos toka:

$$\Phi = \mu_0 \cdot \frac{I \cdot 2 \cdot a}{2 \cdot \pi} \cdot \ln \frac{x_2}{x_1} = \mu_0 \cdot \frac{I \cdot 2 \cdot a}{2 \cdot \pi} \cdot \ln \frac{3a}{a} = \mu_0 \cdot \frac{I \cdot a}{\pi} \cdot \ln 3$$

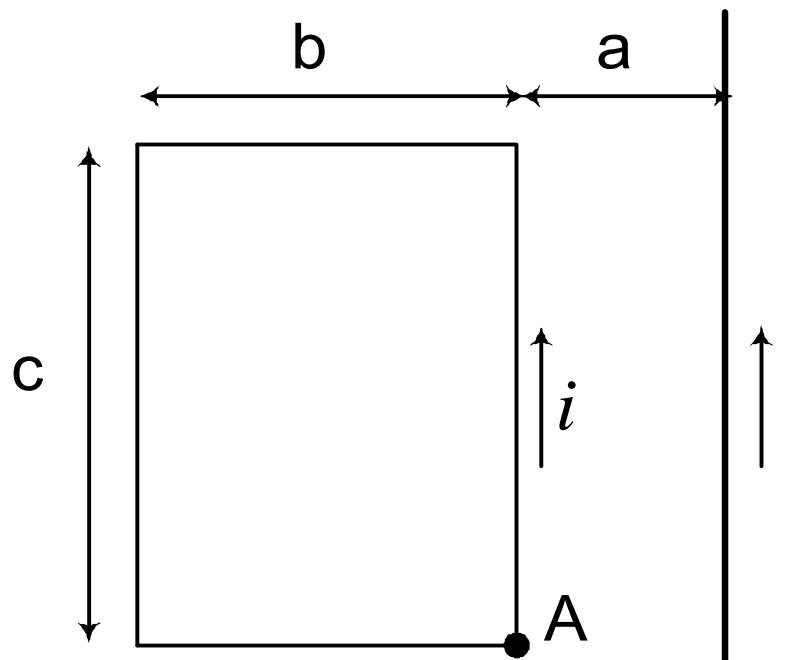
$$\Phi = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot \frac{10 \cdot 10^{-2}}{\pi} \cdot \ln 3 = 44 \text{ [nVs]}$$

Primjer:

Tanka zavojnica pravokutnog presjeka s N zavoja nalazi se u magnetskom polju ravnog dugog vodiča. Odredite promjenu energije ukupnog magnetskog polja sistema ako zavojnicu zarotiramo oko točke A za 90° suprotno od smjera kazaljke na satu. Sistem se nalazi u zraku, a zavojnica je u ravnini s vodičem.

Zadano:

- $a = 10$ [cm]
- $b = 20$ [cm]
- $c = 30$ [cm]
- $I = 10$ [kA]
- $i = 0.5$ [A]
- $N = 50$ [zavoja]



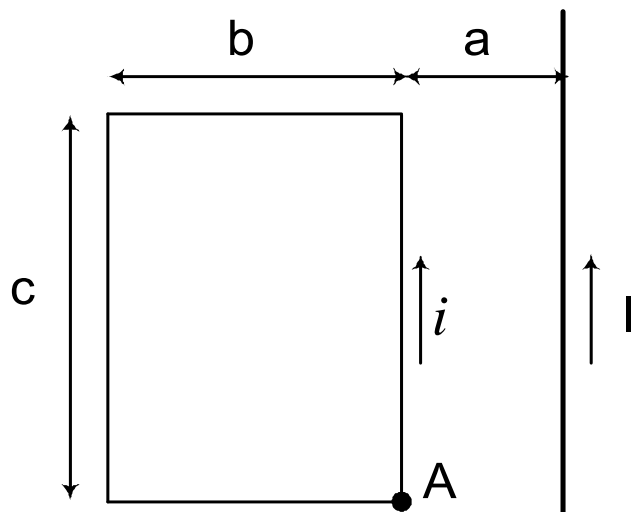
Rješenje primjera:

- Ukupna energija magnetskog polja sistema definirana je kao:

$$W = \frac{L_1 \cdot I_1^2}{2} + \frac{L_2 \cdot i^2}{2} \pm M \cdot I_1 \cdot i$$

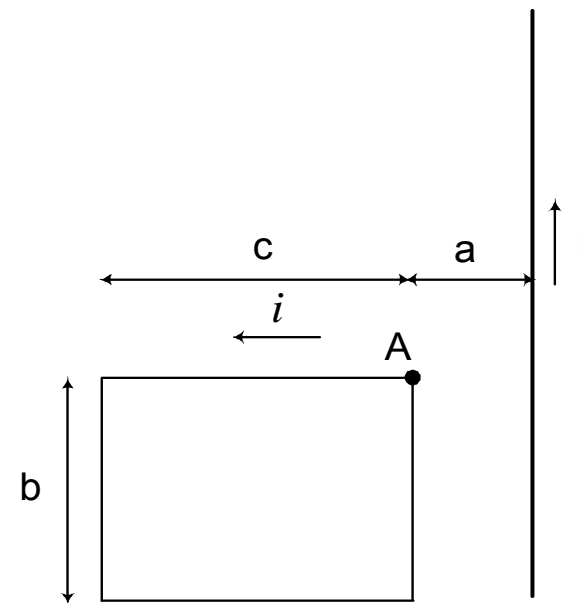
- \pm predznak ovisi o tome da li su tok samoindukcije i tok međuidukcije istog smjera ili ne

- Za prikazani sistem, za prvi i drugi slučaj, smjerovi toka samoindukcije i međuidukcije su isti.



$$W_1 = \frac{L_1 \cdot I^2}{2} + \frac{L_2 \cdot i^2}{2} + M_1 \cdot I \cdot i$$

$$W_2 = \frac{L_1 \cdot I^2}{2} + \frac{L_2 \cdot i^2}{2} + M_2 \cdot I \cdot i$$



Rješenje primjera:

- Razlika energija definirana je kao:

$$\Delta W = W_2 - W_1 = \frac{L_1 \cdot I^2}{2} + \frac{L_2 \cdot i^2}{2} + M_2 \cdot I \cdot i - \frac{L_1 \cdot I^2}{2} - \frac{L_2 \cdot i^2}{2} - M_1 \cdot I \cdot i$$

$$\Delta W = M_2 \cdot I \cdot i - M_1 \cdot I \cdot i$$

- Međuinaktiviteti u prvom i drugom slučaju:

$$M_1 = \frac{N \cdot \Phi_1}{I} = \frac{N \cdot \mu_0 \cdot \frac{I \cdot c}{2 \cdot \pi} \ln \frac{a+b}{a}}{I} = N \cdot \mu_0 \cdot \frac{c}{2 \cdot \pi} \ln \frac{a+b}{a}$$







$$M_2 = \frac{N \cdot \Phi_2}{I} = \frac{N \cdot \mu_0 \cdot \frac{I \cdot b}{2 \cdot \pi} \ln \frac{a+c}{a}}{I} = N \cdot \mu_0 \cdot \frac{b}{2 \cdot \pi} \ln \frac{a+c}{a}$$

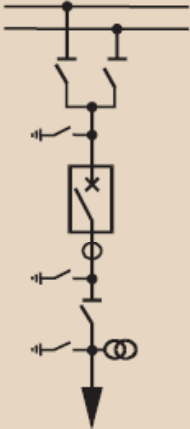
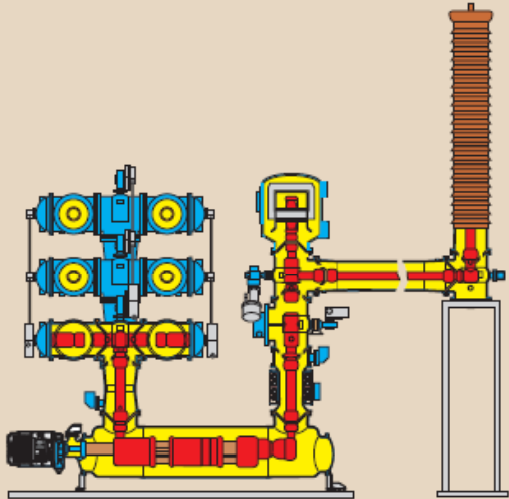
- Promjena energije onda iznosi:

$$\Delta W = I \cdot i \cdot (M_2 - M_1) = \frac{I \cdot i \cdot N \cdot \mu_0}{2 \cdot \pi} \cdot \left(b \cdot \ln \frac{a+c}{a} - c \cdot \ln \frac{a+b}{a} \right)$$

$$\Delta W = \frac{10 \cdot 10^3 \cdot 0.5 \cdot 50 \cdot 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}}{2 \cdot \pi} \cdot \left(20 \cdot 10^{-2} \cdot \ln \frac{40}{10} - 30 \cdot 10^{-2} \cdot \ln \frac{30}{10} \right) = -2.3 \text{ [mW]}$$

SF₆ postrojenje 550 kV

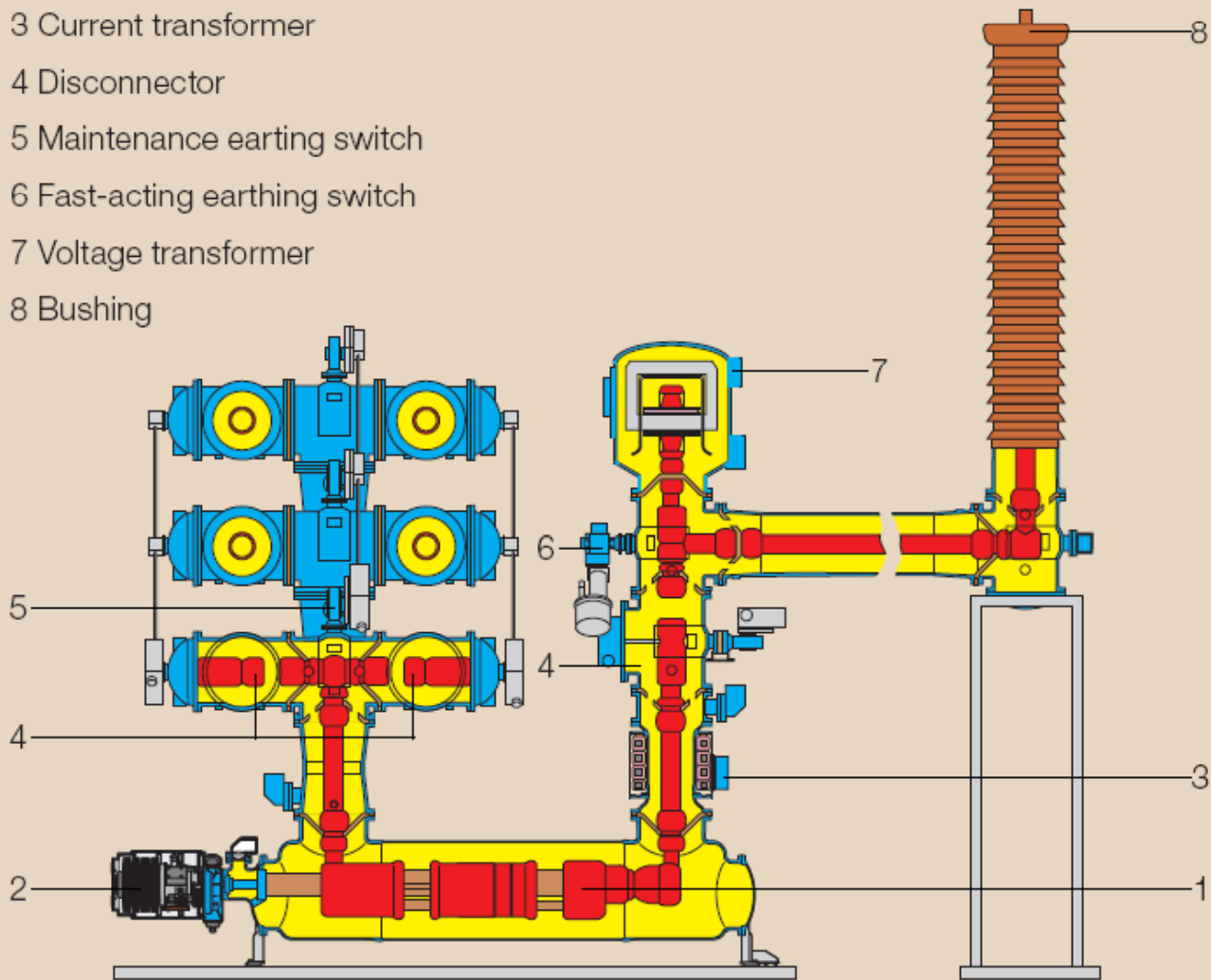
	Active parts under high-voltage
	Enclosure
	SF ₆ -gas
	Insulation material
	Mechanical parts, structures
	Low-voltage parts

GIS-Type	ELK-3	
		
Encapsulation	single-phase	
Rated voltage	kV	420 550
Rated power-frequency withstand voltage	kV	650 740
Rated lightning impulse withstand voltage	kV	1425 1550
Rated current	A	4000 4000
Rated breaking current	kA	63 63

SF₆ postrojenje 550 kV

Legend

- 1 Circuit-breaker
- 2 Operating mechanism (circuit-breaker)
- 3 Current transformer
- 4 Disconnect
- 5 Maintenance earthing switch
- 6 Fast-acting earthing switch
- 7 Voltage transformer
- 8 Bushing



SF₆ postrojenja



800 kV SF₆ postrojenje ABB u Južnoj Africi

SF₆ postrojenja



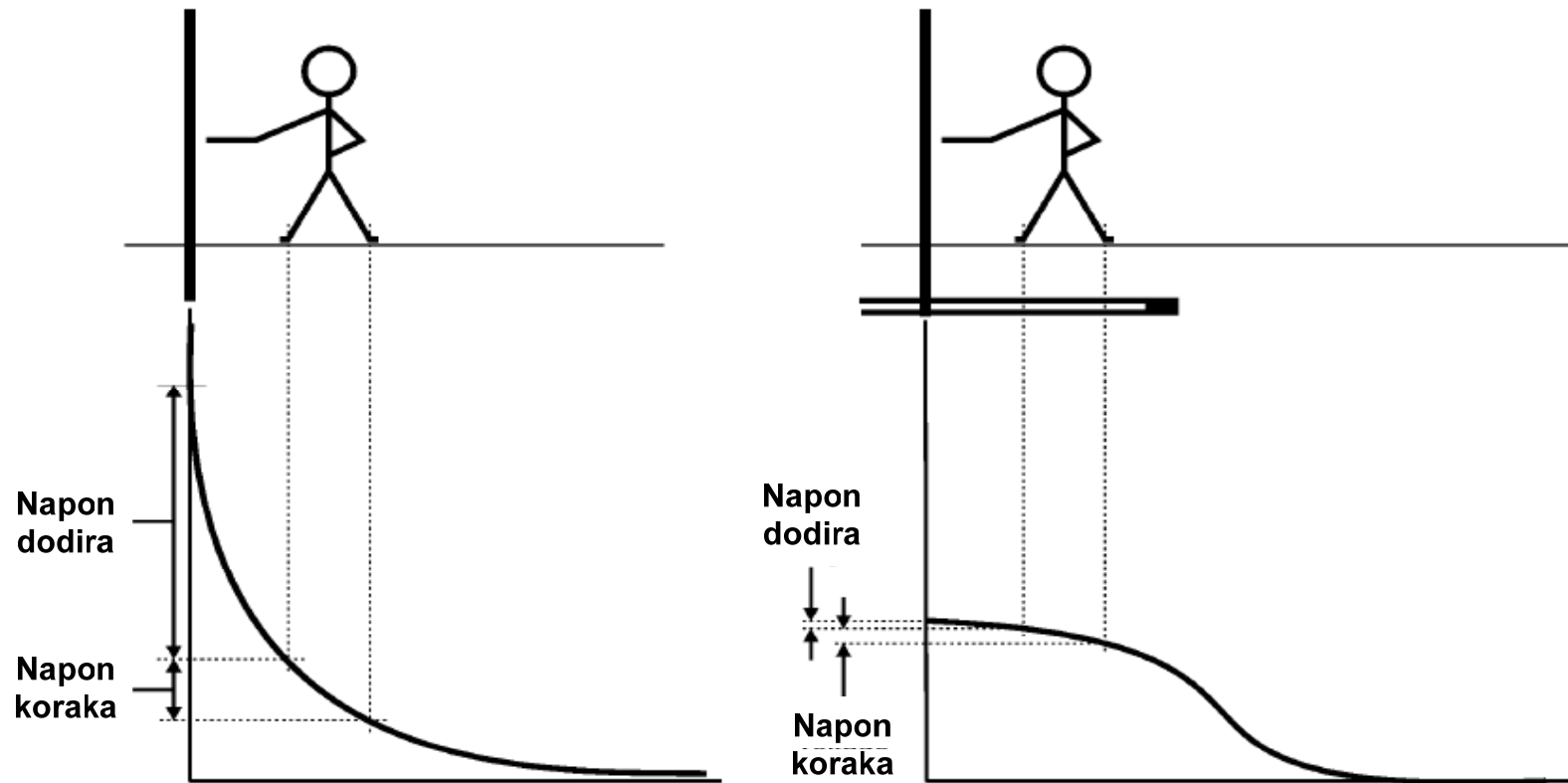
□ Tvrtnka Rio Light u Brazilu imala je dvije transformatorske stanice koje su se nalazile na vrlo skupom zemljištu (u gradskom području). Bilo je potrebno napraviti veće zahvate na postojećim stanicama ili izgraditi nove stanice.



□ Tvrtnka ABB ponudila je rješenje da se postojeće trafostanice zamijene sa dvije 138/13,8 kV SF₆, sa 12 VN polja i 88 SN polja. Izgradnjom SF₆ postrojenja dobila se velika ušteda prostora.

□ Troškove izgradnje dvaju SF₆ postrojenja pokrila je zarada koja se ostvarila prodajom zemljišta, koje se dobilo zahvaljujući SF₆ tehnologiji.

Uzemljenje – napon dodira i koraka

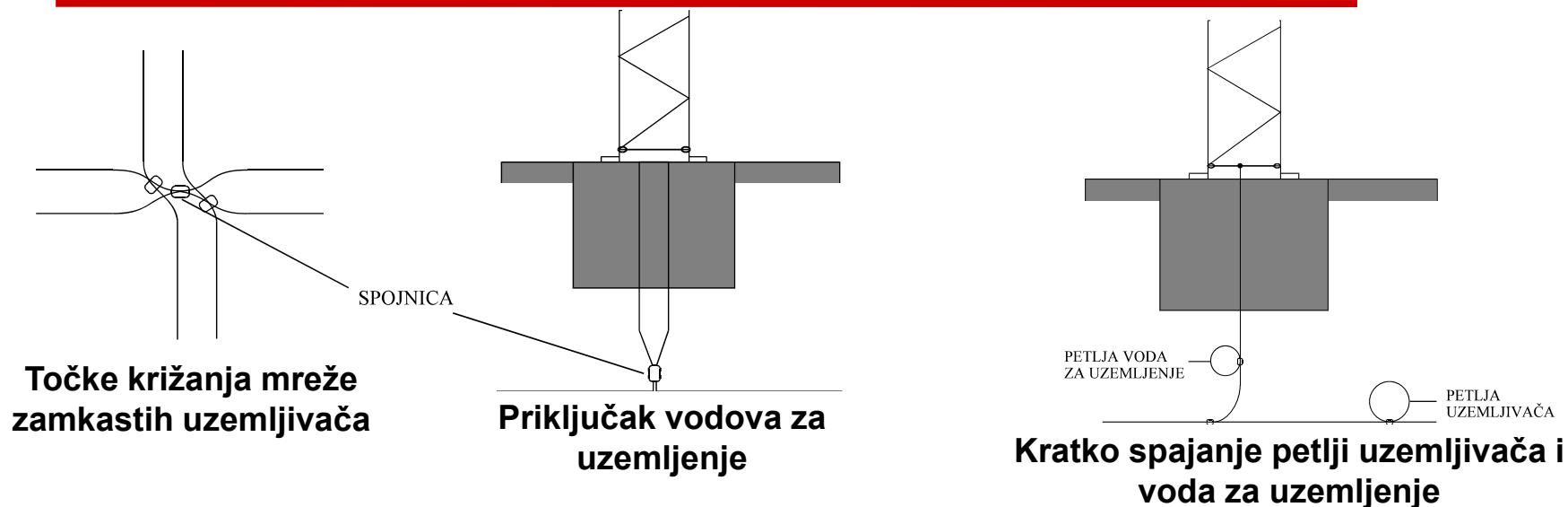


Loše uzemljenje

Dobro uzemljenje

Pravilnom izvedbom uzemljenja smanjuje se napon dodira i koraka i povećava sigurnost ljudi.

Polaganje uzemljenja



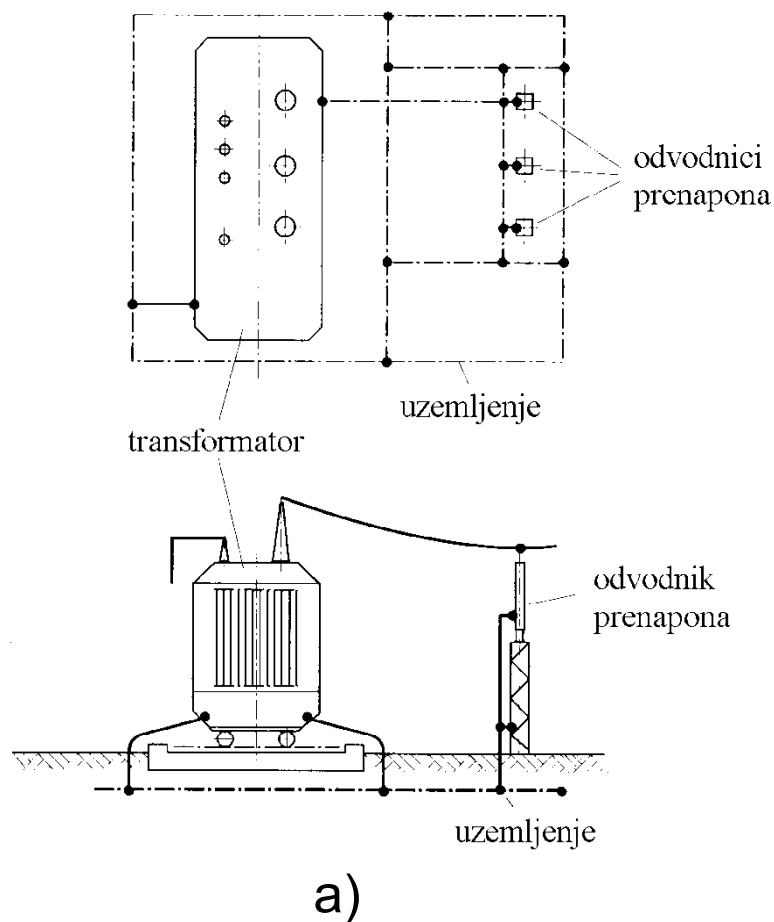
❑ Mjerodavna veličina za smanjenje prijelaznih prenapona je prienosna impedancija, odnosno, mjerodavna veličina nije presjek nego gornja površina uzemljivača, materijal i način polaganja.

❑ U točkama križanja mreže zamkastih uzemljivača treba uzemljivače međusobno spojiti vodljivom vezom, na primjer spojnicom.

❑ Veza između vodova za uzemljenje uređaja i zamkastog uzemljivača treba biti što je moguće kraća i malog induktiviteta, te treba biti električki dobro vodljiva i otporna na koroziju. Ako se zbog potrebe uzemljivanja uređaja rade petlje treba ih u nivou polaganja zamkastog uzemljivača kratko spojiti.

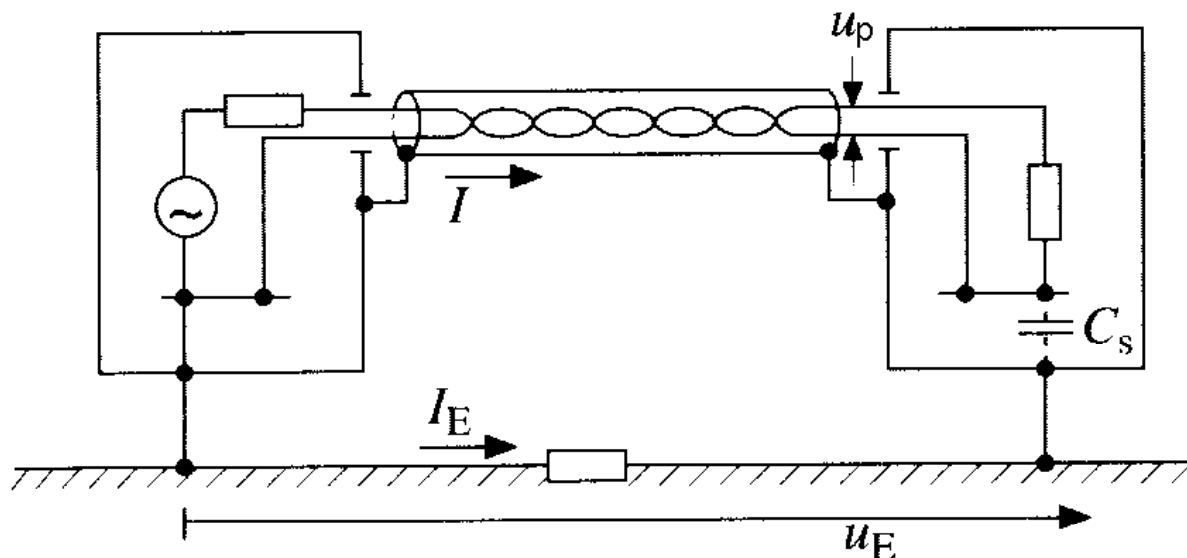
❑ Moguće petlje uzemljivača i vodova uzemljenja, koje nastaju zbog suviše duljine treba također kratko spojiti.

Minimiziranje tranzijentnih razlika potencijala na uzemlivaču



a) Niskoinduktivno povezivanje na strani zemlje između odvodnika prenapona i transformatora b) Površina ograničena transformatorom, spojnim vodovima, odvodnikom prenapona i nosačem te uzemljičkim vodom na strani zemlje, treba biti što je moguće manja

Sprega preko zamke uzemljivača

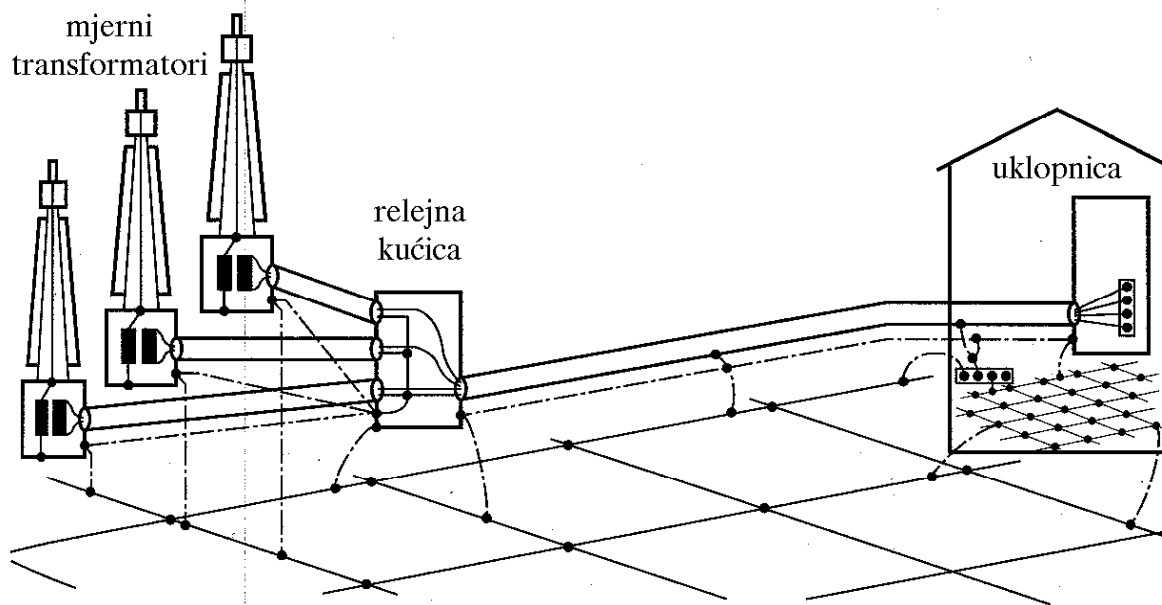


Često zanemareni uzrok nastanka poprečnog napona je sprega preko petlje uzemljivača prema slici. Kod visokih frekvencija nastaje veza, preko parazitnog kapaciteta C_s u desnom uređaju, između strujnog kruga i zemlje. Kada nastane tranzijentna razlika potencijala na uzemljivaču u_E , preko signalnih žila teče struja. Ako signalne žile imaju različitu impedanciju, nastali uzdužni napon na žilama je različit. Razlika uzdužnih napona je poprečni napon u_p .

Da bi se to izbjeglo moraju strujni krugovi biti simetrični prema zemlji. Može se npr. na obje strane prienosne veze postaviti odvojni transformator, kod koga je uzemljenja srednja točka namota.

Objedinjavanje zaštitnih mjera

□ Najznačajnije od navedenih mjera za smanjenje uzdužnih i poprečnih komponenti napona prikazane su zajedno na slici.



□ Kao prvo mjere protiv uzdužne komponente napona: rasklopno postrojenje je izrađeno na zamkastom uzemljivaču, sekundarni vodovi su položeni paralelno uzemljivačima, kabelski plaševi su na oba kraja koaksijalno spojeni s uzemljenim kućištima, paralelno sekundarnim vodovima položeni su vodovi uzemljenja, za još bolju zaštitu i smanjenje strujnog opterećenja kabelskih plašteva oni su uzduž trase i na ulazu u zgradu uzemljeni, zgrada je povezana sa zamkastim uzemljivačem, ormari za smještaj uređaja (releja, instrumenata...) višestruko su uzemljeni.

□ Što se tiče zaštitnih mjera protiv poprečne komponente napona, naznačeno je da sekundarne strujne krugove treba najviše jednom uzemljiti, te da ih treba zrakasto polagati.

SF₆ postrojenja

□ Za smanjenje elektromagnetskih utjecaja u prvome redu važno je pravilno dimenzioniranje uzemljivačkog sustava postrojenja.

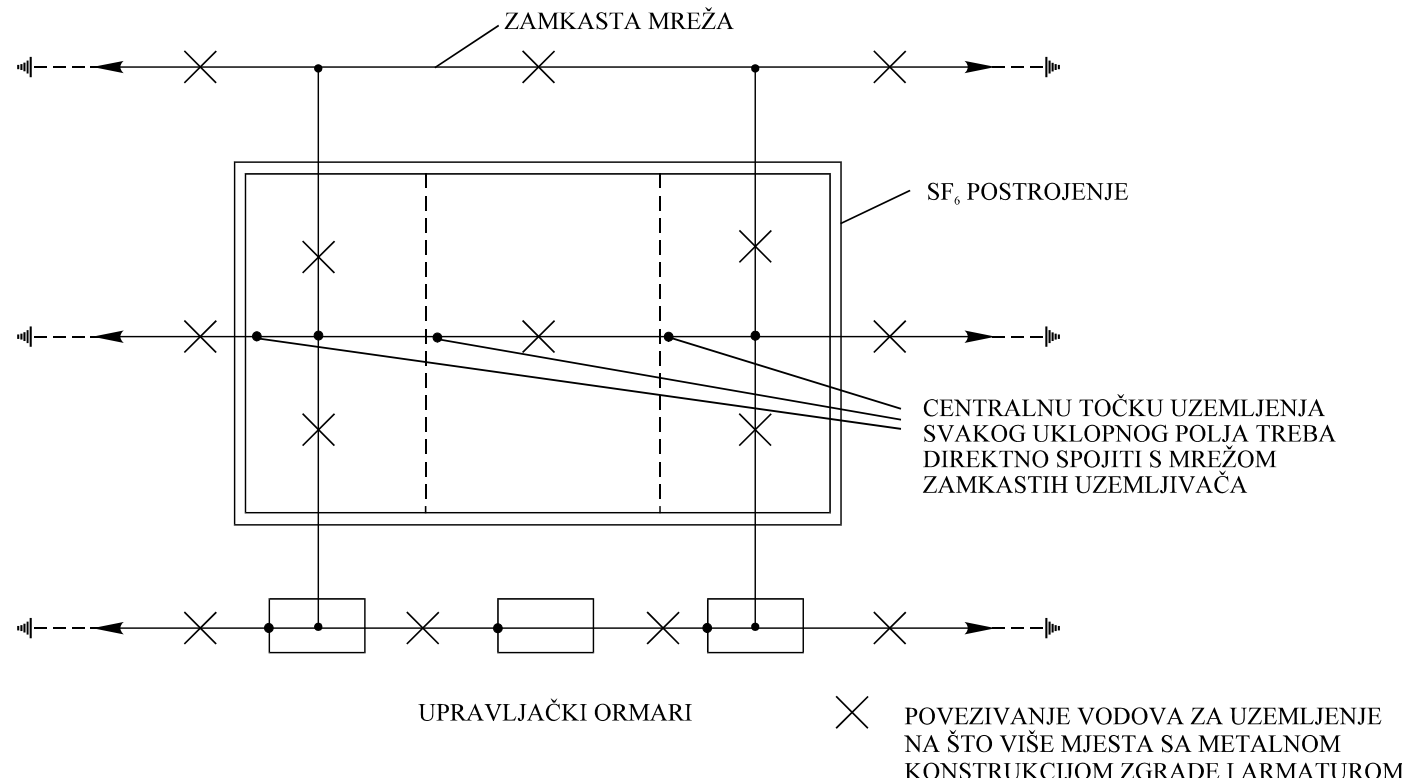
□ U najvećem broju slučajeva, otpor rasprostiranja projektiranog uzemljivačkog sustava VN postrojenja ima niske vrijednosti, što onemogućava nedozvoljeni porast potencijala uzemljivača i svih metalnih dijelova prilikom jednopolnih kratkih spojeva, a time se smanjuju i struje koje se pri tome javljaju u metalnim plaštevima kabela.

□ Za smanjenje utjecaja smetnji povoljno je sve metalne dijelove koji se uzemljuju spojiti na što više mjesta s uzemljivačem čim kraćim vezama. Time se postiže grananje struje kratkog spoja, pa se tako smanjuje elektromagnetsko polje i inducirani naponi u neposrednoj okolini.

□ Međutim, treba imati na umu činjenicu da uzemljivač koji je dobro projektiran i izveden s obzirom na pogonsku frekvenciju od 50 Hz ne mora uvijek uspješno smanjivati prijelazne prenapone u sekundarnom ožičenju, zato jer se tu radi o visokofrekvencijskim pojavama, kod kojih dominantnu ulogu preuzimaju induktiviteti i kapaciteti vodiča, umjesto njihovih radnih otpora.

□ Kod visokofrekvencijskih pojava je efikasnost uzemljivača ograničena na dio uzemljivača u blizini točke ulaska struje. Uslijed toga se u uzemljivačima, uzemljivačkim vodovima i između kućišta opreme koja su povezana uzemljivačkim vodovima pojavljuje potencijalna razlika.

SF₆ postrojenja



□ Sa slike je vidljivo je da je centralnu točku uzemljenja svakog uklopnog polja (pod tim se podrazumijeva modul VN polja koji sadrži sklopne aparate) potrebno direktno spojiti na uzemljivački sustav zamkastih uzemljivača. Osim toga preporuča se na što više mjesta povezati vodove za uzemljenje sa metalnom konstrukcijom zgrade i armaturom.

□ Za oklopljeno postrojenje svakako je preporučljivo povezati oklop postrojenja na uzemljivački sustav na mjestima prelaska postrojenja na provodne izolatore, te na kabelaške glave. Isto tako bi bilo dobro izvršiti dodatno galvansko povezivanje oklopa naponskih i strujnih mjernih transformatora s oklopom ostalih dijelova postrojenja.

SF₆ postrojenja

1 - - - ZAMKASTA MREŽA
TEMELJNOG UZEMLJIVAČA

2 · · · · ZAMKASTA MREŽA
PRIZEMLJA

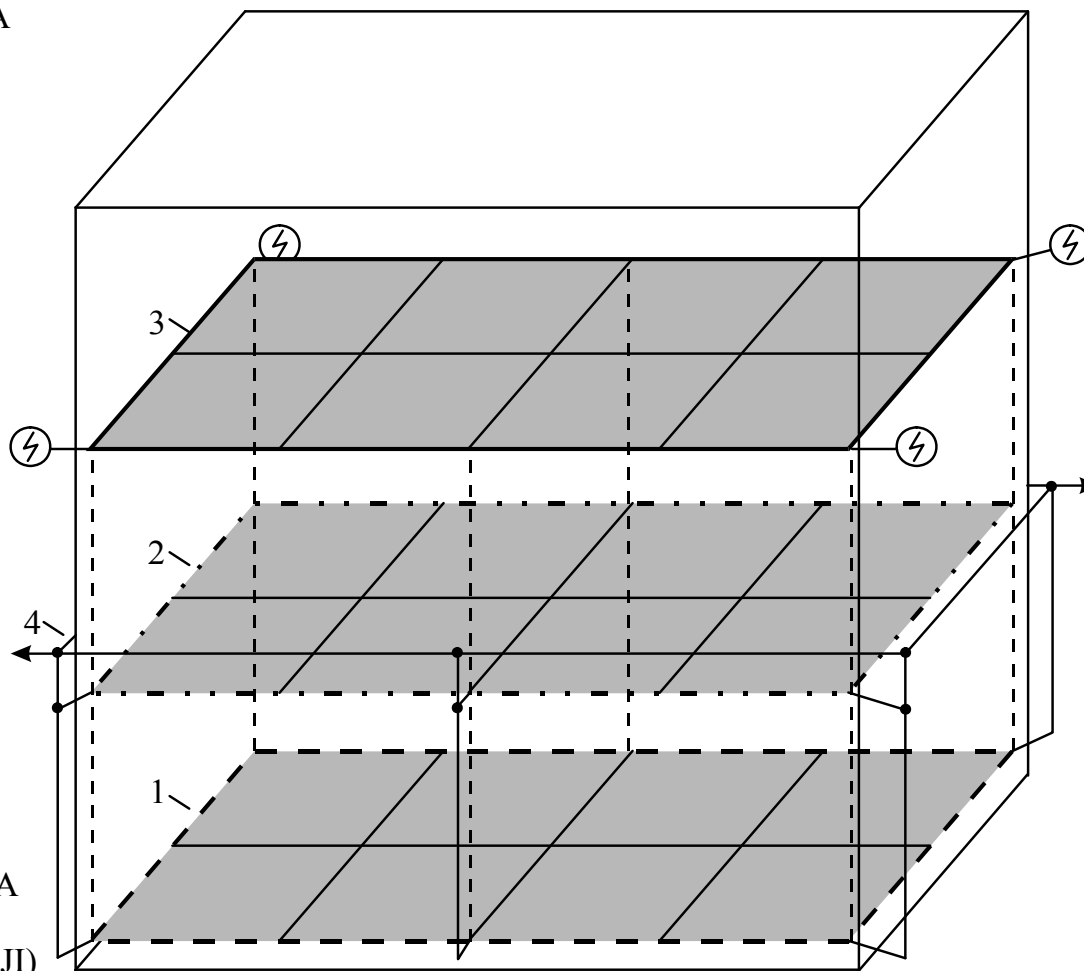
3 ——— ZAMKASTA MREŽA
PRVOG KATA

----- VOD ZA POVEZIVANJE
ZAMKASTIH MREŽA 1,2,3

4 ——— VANJSKI PRSTEN ZA
IZJEDNAČAVANJE
POTENCIJALA

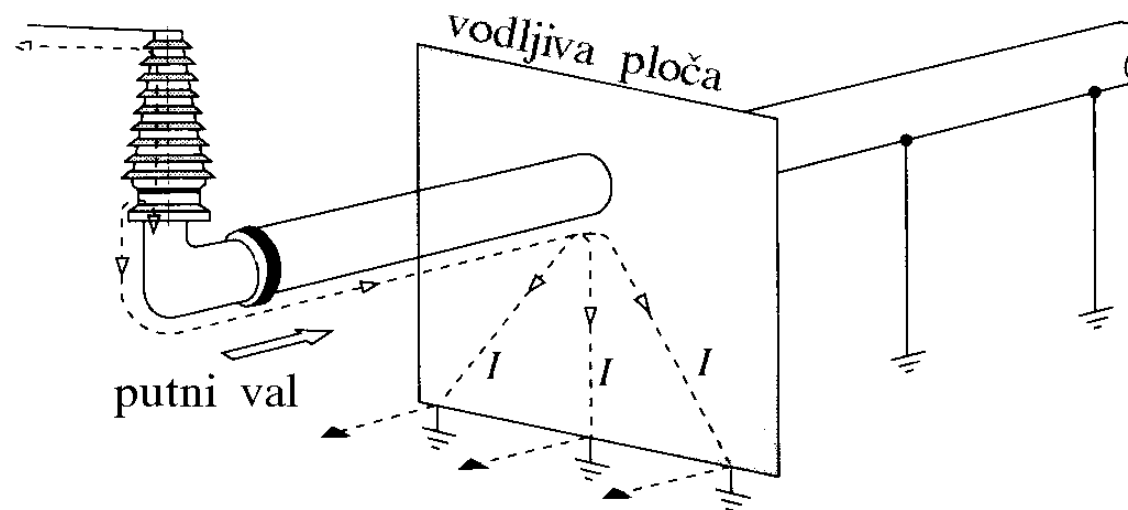
→ PRIKLJUČAK NA
UZEMLJIVAČ VANJSKOG
POSTROJENJA

⚡ PRIKLJUČAK UZEMLJIVAČA
NA GROMOBRANSKU
ZAŠTITU (UKOLIKO POSTOJI)



Unutarnje uzemljenje zgrade rasklopnog postrojenja

SF₆ postrojenja

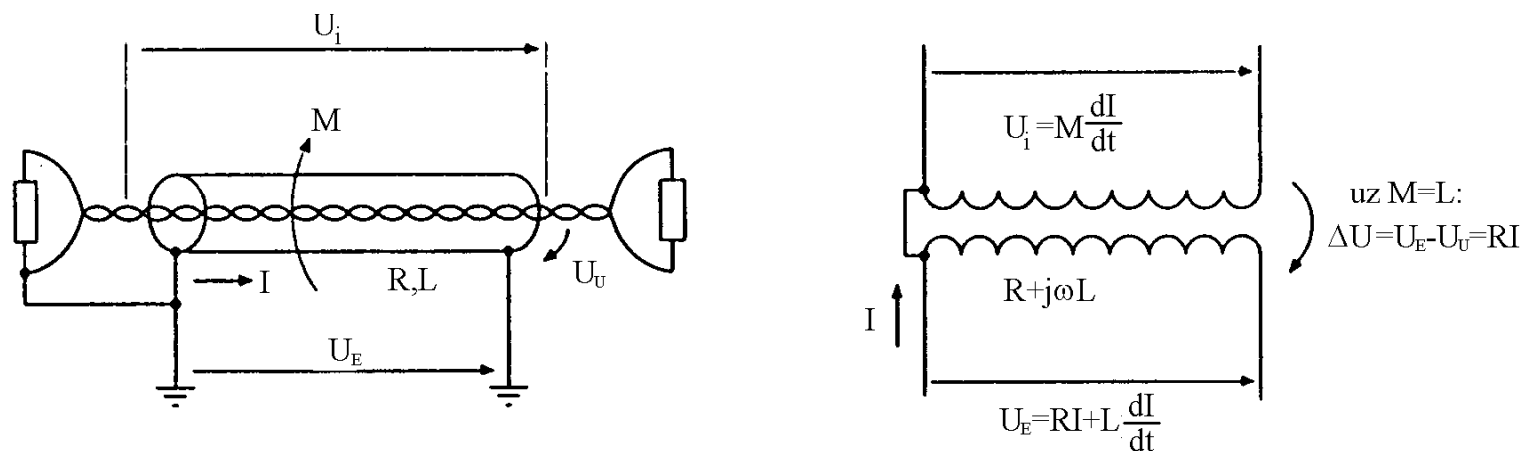


Građevinske ploče mogu poslužiti za smanjenje visokofrekvencijskih prenapona, budući da ploče predstavljaju vodljivu vezu s uzemljivačkim sustavom malog induktiviteta.

Mjerodavna veličina za smanjenje prijelaznih prenapona je prienosna impedancija, odnosno, mjerodavna veličina nije presjek nego gornja površina uzemljivača, materijal i način polaganja. Zato je umjesto bakrenih užeta preporučljiva upotreba širokih bakrenih traka za uzemljenje istog presjeka. Isto vrijedi i za spojne vodove.

Mjere za smanjenje elektromagnetskih utjecaja u sekundarnim krugovima

Potencijalne razlike u uzemlivačkom sustavu izazvane visokofrekvencijskim smetnjama stvaraju uzdužni naponi. Za smanjenje uzdužnog napona potrebno je izvesti pravilno vođenje vodova, njihovo oklapanje i višestruko uzemljenje sekundarnih krugova.



Oklopljeni (s plaštem) sekundarni kabelski vod (lijevo) predložen kao raspodijeljeni transformator (desno)

Za eliminiranje elektromagnetskog utjecaja potrebno je ekran (plašt) kabela uzemljiti na oba kraja, kako je to prikazano slikama.

Obostranim uzemljenjem plašta moguće je tranzijentne razlike potencijala u uzemljenju neutralizirati relativno prema kabelskim žilama.

To je prema slici rezultat induktivne veze između kabelskih žila i plašta.

Mjere za smanjenje elektromagnetskih utjecaja u sekundarnim krugovima

Prema slici razlika potencijala U_E tjera struju kroz plašt, tako da je:

$$U_E = R \cdot I + L \cdot \frac{dI}{dt}$$

R je otpor, a L induktivitet plašta.

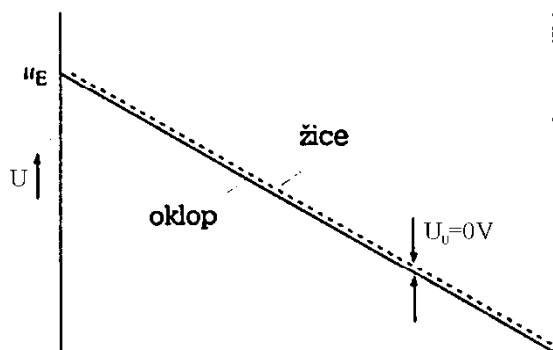
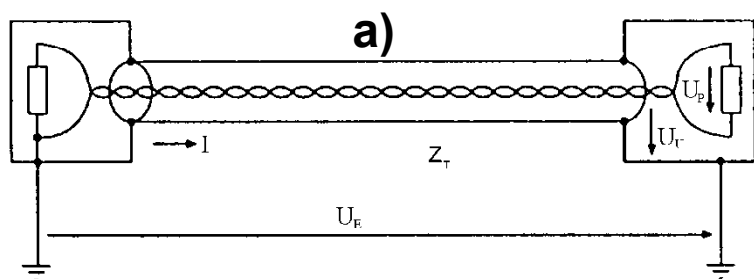
Plašt se može zamisliti kao primarni namot transformatora s jednim zavojem. Kableske žice su sekundarni namot. Za transformator bez rasipnog toka međuinđuktivitet M jednak je induktivitetu primarnog namota. Tako da vrijedi:

$$U_i = M \cdot \frac{dI}{dt} = L \cdot \frac{dI}{dt}$$

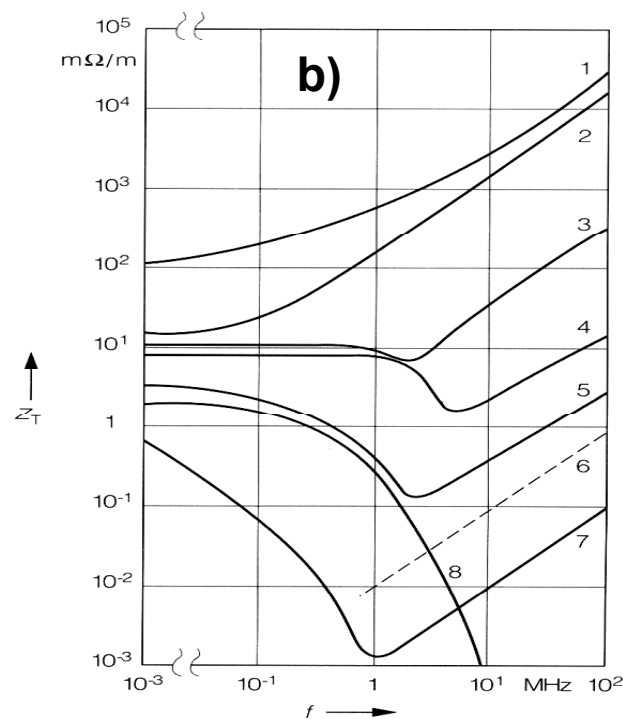
□ Na desnoj strani kabela nastala uzdužna komponenta napona u tom slučaju je:

$$U_U = U_E - U_i = R \cdot I$$

Mjere za smanjenje elektromagnetskih utjecaja u sekundarnim krugovima



Raspodjela potencijala na dvostrano uzemljenom plaštu i kabelskim žilama pri tranzijentnoj razlici potencijala U_E u uzemljenju; Z_T prijenosna impedancija plašta



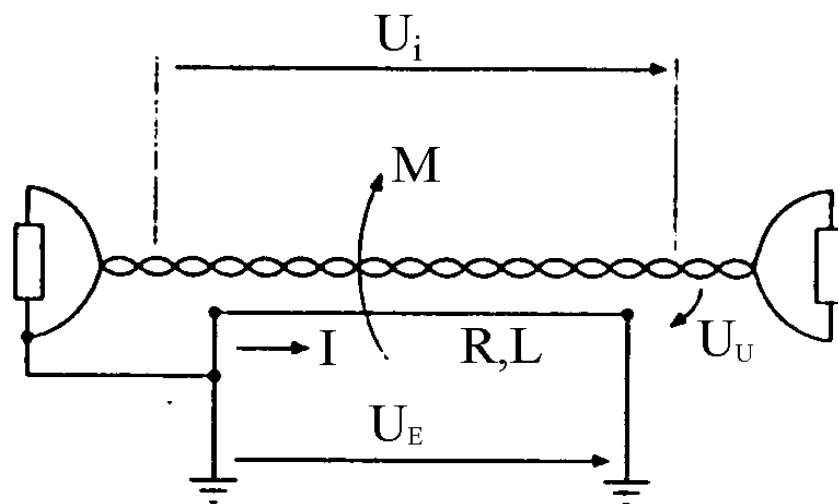
Iznos prijenosnog otpora (impedancije) različitih kabelskih plašteva u ovisnosti o frekvenciji

Za plašt kabela mora se, umjesto omskog otpora, promatrati prijenosna impedancija. Do istog rezultata može se doći i na drugi način. Predodžba plašta kao raspodijeljenog transformatora čini dvije stvari jasnim:

Postoji li na kabelskom plaštu prema slici a) razlika potencijala (tranzijentna) U_E , tada pada napon duž plašta kao u primarnom namotu transformatora linearno od lijeva na desno. Na lijevoj strani imaju kabelske žile na slici a) isti potencijal kao i plašt. Na kabelskim žilama inducira se napon zbog kojega je razlika potencijala na cijeloj duljini kabela između žila i plašta skoro nula. Kao razlika ostaje mali dio napona koji je posljedica omskog otpora primarnog namota transformatora, odnosno prijenosne impedancije (slika b).

Mjere za smanjenje elektromagnetskih utjecaja u sekundarnim krugovima

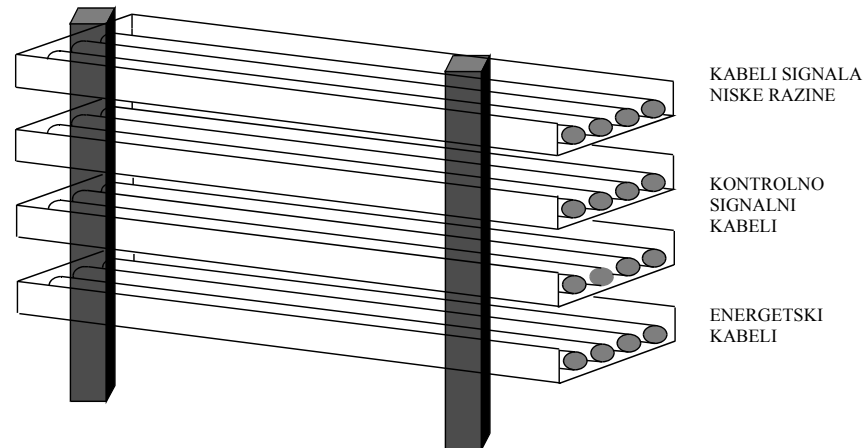
□ Za kabel bez plašta s paralelno postavljenim vodom uzemljenja prema slici treba primijeniti isti izvod s tom razlikom da induktivna veza između voda uzemljenja i kabljskih žica nije 100%, tj. da postoji rasipni induktivitet između primarnog i sekundarnog namota raspodijelnog kompenzacionog transformatora. Uzdužna komponenta napona je sada veća nego prije:



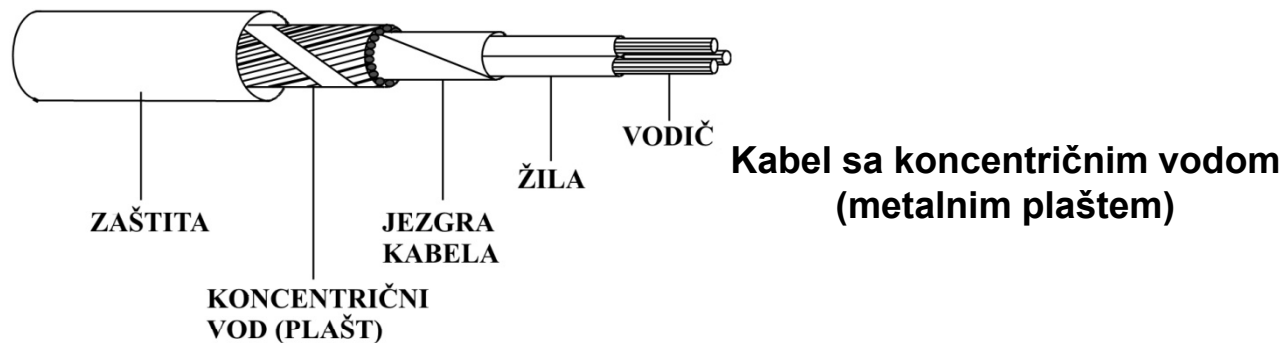
Uzdužna komponenta napona U_U na sekundarnim vodovima zaštićenim samo sa paralelnim vodom uzemljenja

Preporuke za polaganje i izbor sekundarnih kabela

U kablskom kanalu najidealniji raspored je onaj u kojem su kabele sekundarnih krugova položeni između uzemljenih i međusobno spojenih polica kablskih nosača. Jedna mogućnost izvedbe prikazana je na slici:



Vodovi mjernih naponskih i strujnih transformatora, kontrolnih i niskonaponskih krugova trebaju biti oklopljeni s metalnim plaštevima koji mogu voditi struje.

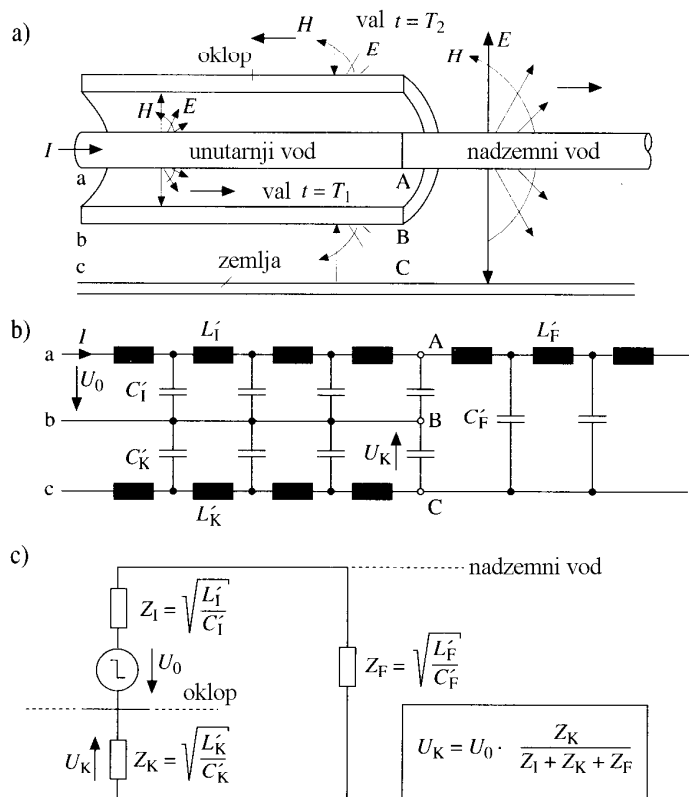


Gdje je to moguće kabele treba položiti paralelno i što je moguće bliže uzemljivačima. Vod ili traka uzemljenja postavljeni u kablski kanal ne mogu nadomjestiti uzemljivač, ali mogu doprinijeti smanjenju prenapona.

Prijenos smetnji u oklopljenim rasklopnim postrojenjima

- ❑ Zbog konstrukcije oklopljenog rasklopnog postrojenja (vodiči su oklopljeni i izolirani od oklopa plinom SF₆) dijelovi postrojenja imaju veći električni kapacitet od odgovarajućih dijelova vanjskih postrojenja.
- ❑ Sklopne manipulacije rastavljačima u ovakvim postrojenjima stvaraju prenapone koji nemaju visoku amplitudu ali su vrlo strmog čela. Oni prelaze na vanjsku stranu oklopa, što dovodi do njegovog tranzijentnog porasta potencijala.
- ❑ Ovi prenaponi se isto tako prenose preko mjernih transformatora kapacitivnim putem u sekundarne krugove. Za ublažavanje posljedica ovih fenomena važna je izvedba uzemljivačkog sustava, odnosno mora se voditi računa o visokofrekvencijskim karakteristikama uzemljivačkih veza.

Prijenos smetnji u oklopljenim rasklopnim postrojenjima



Nastanak tranzijentnih porasta potencijala oklopa u oklopljenim rasklopnim postrojenjima

a) principijelna predodžba širenja putnog vala

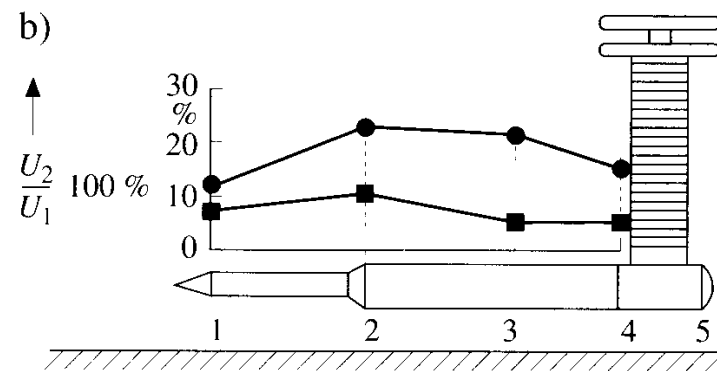
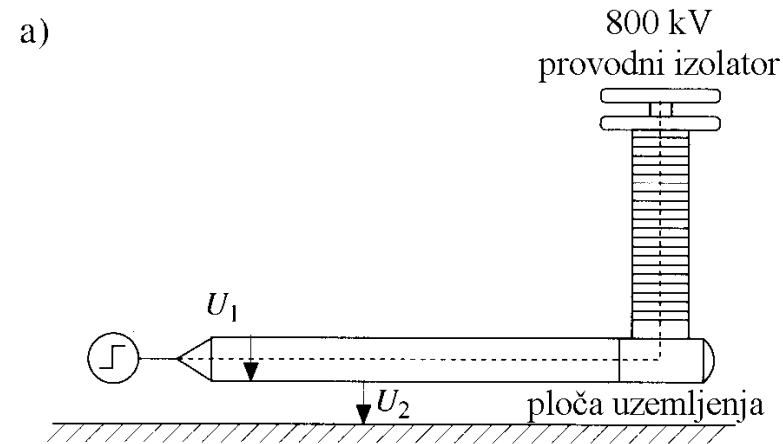
b) nadomjesna shema s raspodijeljenim elementima

c) nadomjesna shema s koncentriranim elementima

□ I u oklopljenim rasklopnim postrojenjima najčešći su izvori smetnji sklopne manipulacije. Želimo li si predočiti kako smetnja izlazi iz oklopa na sekundarne uređaje, promotrimo mehanizam na slici. Pri sklopnim manipulacijama u oklopljenim postrojenjima šire se putni valovi, od polova prekidača na sve strane unutar oklopa. Samo kroz otvore na oklopu mogu elektromagnetska polja povezana sa putnim valovima napustiti oklop.

□ Ti otvori su neizbježni za provodne izolatore rasklopnog postrojenja, ali često su to i kabelaške glave, kompenzacijske pločice u spojevima oklopa, strujni i naponski mjerni transformatori ili druga mjesta za mjerenje. Slika prikazuje kritičan slučaj, prolaz elektromagnetskog vala na jednom provodnom izolatoru.

Prijenos smetnji u oklopljenim rasklopnim postrojenjima



Principijelni pokusi sa niskim naponom za demonstraciju tranzijentnih porasta potencijala oklopa za vrijeme sklopnih operacija u primarnim krugovima. Sklopna operacija je simulirana step funkcijom napona.

a) shema pokusa

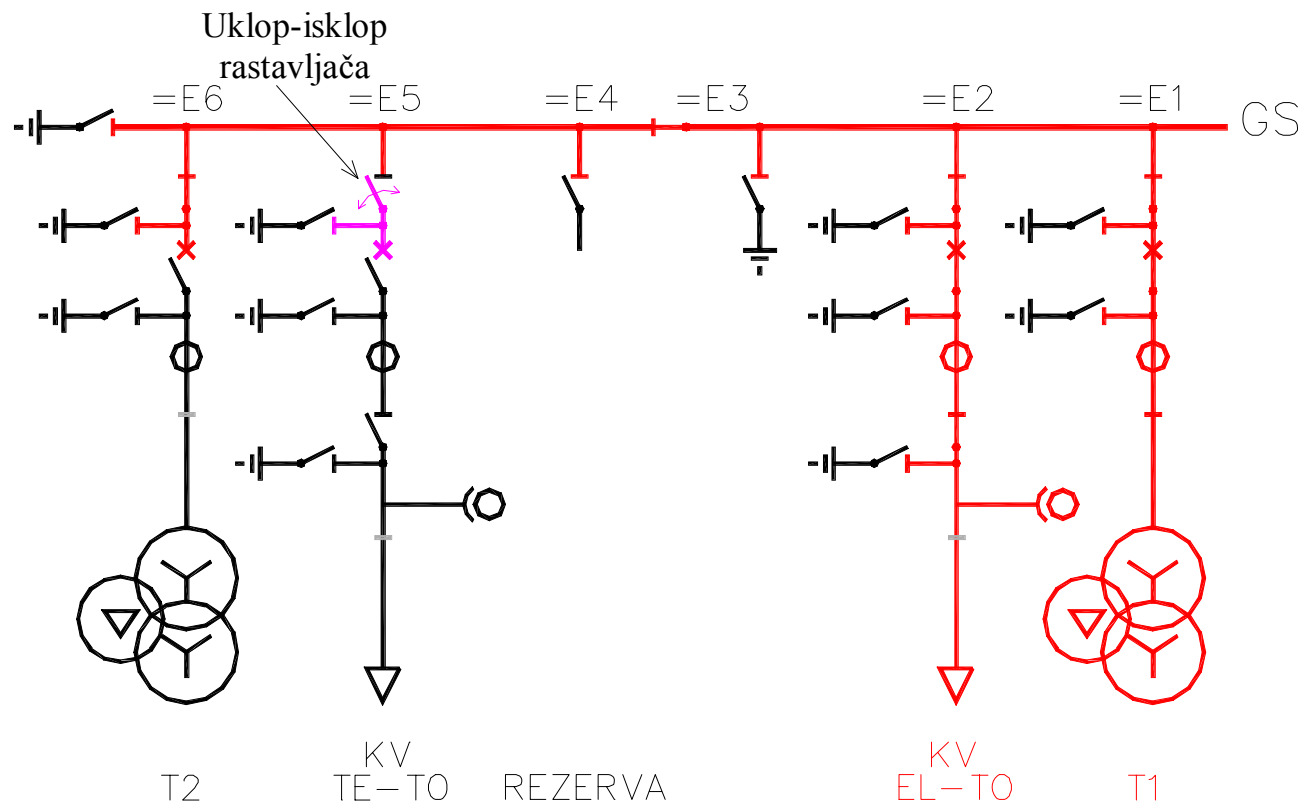
b) porast napona (• točka 5 neuzemljena; ■ točka 5 uzemljena)

U_1 - impulsni izvor unutar oklopa

U_2 - napon između oklopa i zemlje

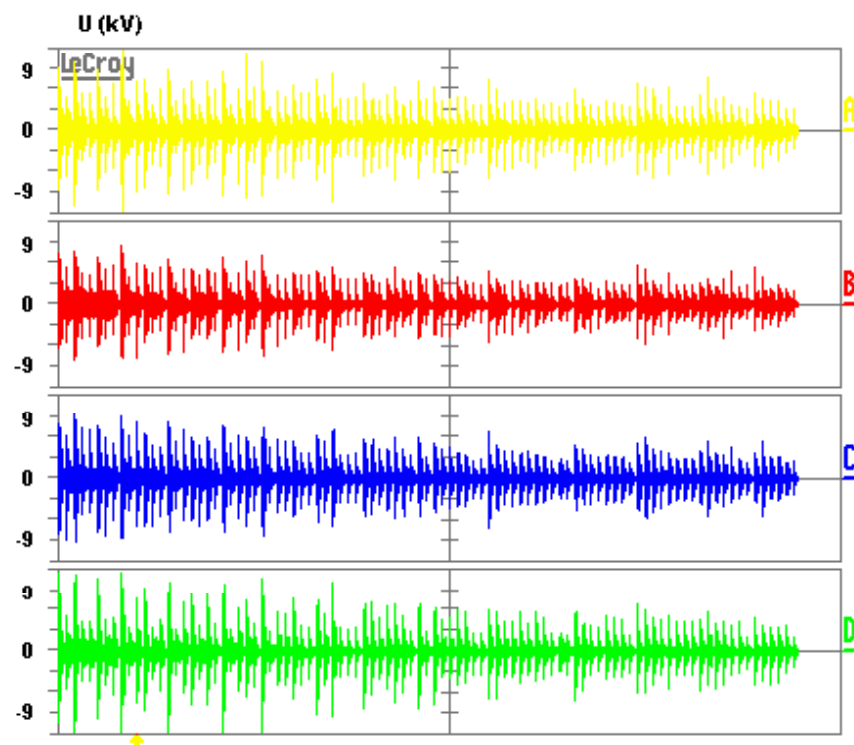
Primjer mjerenja

Mjerenja na oklopu i plaštevima kabela:



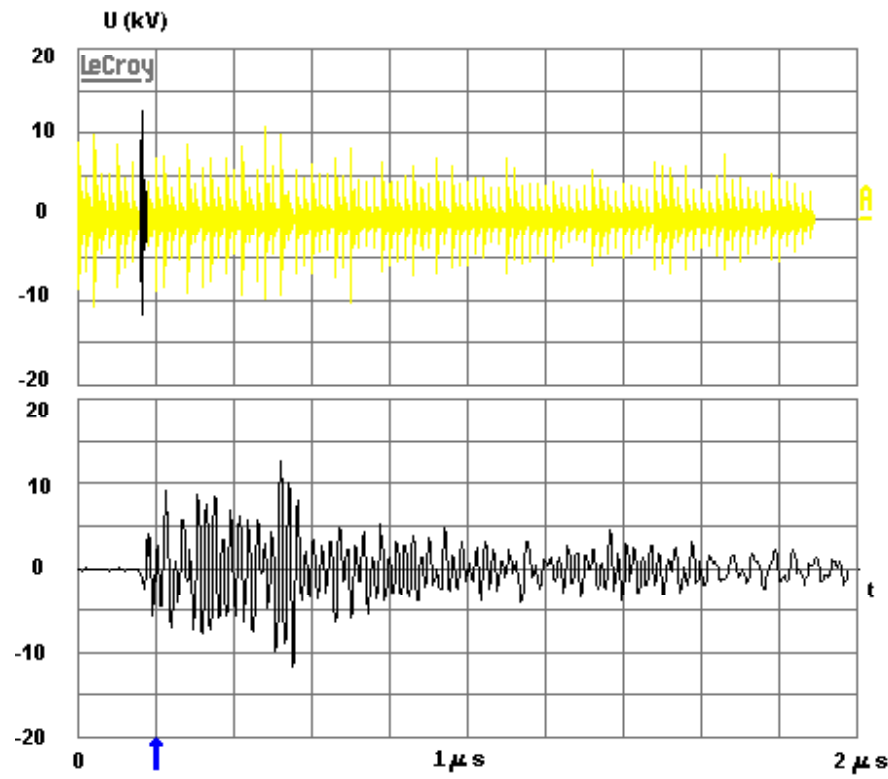
Na priključku energetskog kabela, koji predstavlja diskontinuitet širenju elektromagnetskoga vala, dolazi do prelaska unutarnjih prenapona na vanjske dijelove oklopa i do porasta potencijala oklopa prema uzemljivaču. Prilikom mjerenja napona oklopa postrojenja i plašteva VN kabela je snimljen čitav niz sekvenci proboja koje se dešavaju tijekom uklopa ili isklopa rastavljača u polju E5. Uklopno stanje postrojenja je prikazano na slici.

Primjer mjerenja



95 segmenata, $t_{\text{ukupno}} = 260 \text{ ms}$

Oscilogrami napona na oklopu i plaštevima kabela u sve tri faze (uklop A70)



Napon oklopa (uklop A70) i uvećani segment 9 - u vremenskoj i frekvencijskoj domeni

Sažetak mjera za postizanje EMK u VN postrojenjima

