

ELEKTROMAGNETSKA KOMPATIBILNOST U ELEKTROENERGETSKIM POSTROJENJIMA

Dr. sc. Milan Puharić, Zagreb

UDK 621.33:658.516
PRETHODNO PRIOPĆENJE

Elektrotehnička oprema treba zadovoljiti uvjete vezane za Elektromagnetsku kompatibilnost EMC već pri izradi idejnog projekta. Potrebno je primijeniti razne principe i pravila prilikom izrade opreme kao i njene ugradnje.

U članku je su opisani izvori i primatelji raznih vrsta perturbacija kao i mjere u cilju njenih eliminiranja.

Prikazuju se osnovne postavke proučavanja elektromagnetske kompatibilnosti. Sažeto su prikazani mehanizmi koji dovode do raznih vrsta međutjecaja, kao i neke okvirne numeričke vrijednosti koje su dobivene mjerenjima u postrojenjima. Pokazane su i neke osnovne mjere za smanjenje elektromagnetskih utjecaja u postrojenjima.

Ključne riječi: elektromagnetska kompatibilnost, izvor, sprega, primatelj.

1. UVOD

Elektroenergetska postrojenja u koja ulaze svi tipovi elektrana, trafostanice, centri za upravljanje kao i ukupna električna mreža, postaju sve kompleksniji, pa su tako i standardi koji definiraju njihov rad sve zahtjevniji. Elektromagnetska kompatibilnost je relativno nova disciplina koja proučava interakciju izvora smetnji i primatelja, dakle smetnje na uređajima zbog međusobnih elektromagnetskih utjecaja.

Elektromagnetska kompatibilnost (EMC) koju definiramo kao sposobnost uređaja, opreme ili sustava da djeluje na zadovoljavajući način u svom elektromagnetskom okruženju kao i da ne emitira nedozvoljene smetnje u okoliš, zahtijeva poznavanje mehanizama koji dovode do intrakcije izvora i primatelja. Stoga će se u članku prikazati osnovni pojmovi i zakonitosti koji dovode do međusobnih utjecaja kao i mjere za njihovo suzbijanje.

2. OSNOVNA RAZMATRANJA O EMC

EMC je disciplina koja proučava interakcije između elemenata koji emitiraju elektromagnetske smetnje kao i onih koji su na njih osjetljivi (primatelji).

Oduvijek je poznato da je električna oprema podložna djelovanju različitih elektromagnetskih smetnji kao i činjenici da ih taj isti uređaj može više ili manje stvarati. Te su smetnje generirane na različite načine, međutim njihov uzrok su u osnovi nagle promjene električnih veličina kao što su napon i struja. Jedan od najčešćih primjera smetnji su operacije uklapanja/isklapanja SN i VN aparata. One se mogu širiti duž elek-

tričnih vodova i kabela, ili djelovati zračenjem u formi elektromagnetskih valova. Neželjene posljedice ovih smetnji su na primjer smetnje u emitiranju radio valova ili pak perturbacije u sustavima nadzora i upravljanja. Općenito se smetnje, ovisno o klasi, tipu te uzroku mogu prikazati na način koji je dan u tablici 1.

Tablica 1. Smetnje razvrstane po kategorijama

| Klasa | Tip | Uzrok |
|---------------------|----------------|------------------------------------|
| energetski | propadi napona | permutacija izvora |
| | | kratki spoj |
| srednje frekvencije | harmonici | pokretanje motora |
| | | sustavi s poluvodičima |
| visoke frekvencije | prenaponi | lučne peći |
| | | direktni i indirektni udarci groma |
| | | operacije sklapanja |
| | | isklapanja kratkih spojeva |

Važnost discipline EMC se zadnjih godina povećava. Sljedeći glavni faktori su tome uzrok:

- smetnje su sve veće jer se povećavaju struje i naponi u sustavima
- elektronički sklopovi su sve osjetljiviji
- udaljenosti između osjetljivih elektroničkih sklopova i energetskih krugova su sve manje.

Jedan od klasičnih primjera primjene EMC-a je funkcioniranje sklopnih blokova gdje se susreću energetski krugovi s elektroničkim sklopovima u funkciji zaštite odnosno nadzora i upravljanja. EMC je kriterij koji se

mora uzeti u obzir u svim fazama razvoja i konstrukcije proizvoda, kao i tijekom instalacije i ožičenja.

Proces proučavanja EMC je veoma složen, a može se podijeliti u tri cjeline:

- generator smetnje ili izvor
- širenje ili sprega između izvora i primatelja
- element koji je podložan smetnji ili primatelj.

Iako ove tri komponente nisu striktno neovisne, one se u praksi takvima smatraju. Sama teorija EMC te proračuni vezani uz nju su veoma složeni. Susreće se s teorijom širenja valova duž nadzemnih vodova i kabela te složenim računom elektromagnetskog zračenja. Ipak, u praksi se nastoji EMC svesti na korištenje određenog broja pojednostavljenih hipoteza koji služe kao osnova u modeliranju ovih pojava, naravno uz stalnu mogućnost raznih pokusa i mjerenja.

3. IZVORI SMETNJI

Svi uređaji ili fizikalno-električni fenomeni koji su u stanju emitirati elektromagnetske smetnje zovu se izvori. Oni mogu prenositi smetnje bilo vođenjem bilo elektromagnetskim zračenjem. Najznačajniji uzroci smetnji su:

- energetske vodovi svih nivoa (NN, SN i VN)
- radio smetnje
- elektrostatska pražnjenja
- atmosferska pražnjenja.

Kod prijenosnih i distributivnih vodova smetnje se generiraju otvaranjem i zatvaranjem strujnih krugova na način:

- u niskonaponskim mrežama otvaranje induktivnih krugova kao na primjer sklopki koje posjeduju zavojnice, krugova s elektromotorima, krugova s elektroventilima stvaraju na krajevima zavojnica prenapone visokih amplituda (nekoliko kilovolta) te veoma visokih frekvencija (desetke MHz)
- u srednjonaponskim i visokonaponskim mrežama otvaranje i zatvaranje rastavljača izaziva pojavu prenaponskih valova veoma strma čela (nekoliko nanosekundi). Ove su pojave naročito prisutne kod oklopljenih postrojenja (u SF₆ plinu). Ovi su prenaponski valovi naročito opasni na sustave s mikroprocesorima.

Radio smetnje koje se javljaju kod sustava daljinskog vođenja, radio komunikacija, itd., pogađaju elektroničku opremu. Ovakve pojave dostižu amplitude od nekoliko volta po metru. Kako se komuniciranje radio vezama iz godine u godinu povećava nužno je osjetljivu opremu zaštititi.

Elektrostatska pražnjenja se često izostavljaju pri analizi izvora smetnji. Međutim čovjek se hodanjem po raznim umjetnim materijalima (tapison itd.) može elektrostatski nabiti na potencijal koji zna prijeći 25 kV. Bilo koji kontakt s elektroničkom opremom iza-

ziva električna pražnjenja koja imaju vrlo kratko trajanje čela te su po nju veoma opasna.

U sljedećim poglavljima će se opisati neke od smetnji koje često susrećemo u praksi.

3.1. Smetnje izazvane otvaranjem/zatvaranjem sklopnih uređaja

U okolišu visokonaponskih i srednjonaponskih trafostanica mogu se pojaviti veoma visoki iznosi elektromagnetskih polja impulsnog oblika. Manevri sklopnih uređaja stvaraju promjene napona ekstremno kratkim vremenima. Zatvaranje jedne 24 kV sklopke može izazvati preskoke (takozvana pretpražnjenja) na polovima visine više desetaka kV u vremenu od nekoliko nanosekunda. Mjerenja u laboratorijima koja su provedena prilikom operacija sklapanja, na udaljenosti jedan metar [5] od srednjonaponskih sklopnih blokova napona 24 kV, su pokazala da elektromagnetsko polje sinusnog oblika dostiže tjemenu vrijednost od 7,7 kV/m. Frekvencija koja se tom prilikom javlja je reda 80 MHz. Ovakva elektromagnetska polja su veoma značajna za proučavanje elektromagnetske kompatibilnosti, jer se šire duž obližnjih kabela, zračnih vodova, sabirnica itd. Tako na primjer sabirnice koje prime ove signale postaju prave antene koje zrače magnetska polja visokih frekvencija.

Ovaj je fenomen naročito značajan kod oklopljenih trafostanica ispunjenih SF₆ plinom. Ovakve stanice posjeduju strukturu koaksijalnog kabela, koja se fizikalno može nadomjestiti konstantnom valnom impedancijom. Prilikom manevara sklopnim uređajima stvaraju se putni valovi koji se reflektiraju na krajevima oklopljenog postrojenja. Rezultat procesa su stacionarni valovi određene amplitude i frekvencije, određeni uglavnom dimenzijama postrojenja.

Elektronička oprema kao što su zaštita, uređaji za upravljanje i nadzor osjetljivi su na ovakve perturbacije te je za procjenu smetnji potrebno izvršiti prilično složene proračune. Uz to je neizbježno provesti mjere za smanjenje utjecaja navedenih smetnji, o kojima će se govoriti kasnije.

3.2. Atmosferska pražnjenja

Atmosferska pražnjenja su jedan od najčešćih uzroka kvarova na niskonaponskim uređajima, elektroničkim sklopovima, računalima itd. Osim direktnog utjecaja na niskonaponske krugove, udari groma mogu se dogoditi i na srednjonaponskim vodovima i posredno ugroziti osjetljive niženaponske uređaje.

Atmosferski prenaponi u srednjonaponskim mrežama se mogu razdijeliti u dvije kategorije:

- prenaponi zbog direktnih udara groma u fazne vodiče
- prenaponi zbog indirektnih udara groma u okolišu voda (inducirani prenaponi).

Srednjonaponske mreže imaju relativno nisku razinu izolacije pa direktni udari u fazne vodiče ili stupove nadzemnih vodova bez zaštitnih vodiča uzrokuju pre-

skoje preko izolatora. Prenaponi na vodičima ne ovise o mjestu udara groma.

Struja groma koja teče svojim kanalom izaziva magnetsko polje u okolici koje djeluje na taj način da inducira napon na susjednim objektima. U slučaju udara groma u blizini nadzemnog voda, induciraju se na vodičima prenaponi koji mogu nadmašiti njegovu izolacijsku čvrstoću.

Sa stanovišta parametara prenapona koji su važni za zaštitu voda (npr. amplitude, strmine, energija) prenaponi uslijed direktnih udara bitno razlikuju od induciranih prenapona. Stoga je važno znati koliko je očekivanje događaja svakog od spomenutih vrsta prenapona. Broj očekivanih događaja ovisi bitno o izloženosti (ekspoziranosti) vodova kao i zaštićenosti od obližnjih objekata, za oba slučaja.

Osim gore opisanih utjecaja SN vodova koji se javljaju takozvanom indukcijom ili vođenjem postoje i direktni utjecaji atmosferskih pražnjenja koji se putem elektromagnetskih valova induciraju na niskonaponskim krugovima. Načini sprege između izvora perturbacije (npr. udara groma) i primatelja (niskonaponskih kabela, električnih uređaja), bit će dano u sljedećem poglavlju.

3.3. Harmonici u mrežama

Električna oprema koja se koristi u elektroenergetskim mrežama predviđena je za rad u uvjetima simetričnog sinusoidalnog napona, čiji iznos je jednak ili blizu nominalnom naponu. Kod odstupanja napona od sinusoidalnog valnog oblika koji prelazi standardom normirane veličine, rad uređaja koji su priključeni na elektroenergetski sustav često je poremećen.

Glavni efekti harmonika napona i struje u elektroenergetskom sustavu su:

- nastanak serijske i paralelne rezonancije;
- povećanje iznosa harmonika napona uslijed serijske i paralelne rezonancije;
- smanjenje efikasnosti proizvodnje i prijenosa električne energije i njezine upotrebe;
- starenje izolacije električnih uređaja te skraćivanje njihovog životnog vijeka;
- kriva prorada zaštitnih uređaja.

4. SPREGA IZMEĐU IZVORA I PRIMATELJA SMETNJI

Pod elektromagnetskom spregom podrazumijeva se veza, prijelaz ili prijenos elektromagnetskih smetnja ili perturbacija od izvora prema primatelju.

Koeficijent sprege se označava koeficijentom k izraženom u decibelima (dB), koji se definira kao efikasnost prijelaza jedne smetnje od izvora prema potencijalnom primatelju. Koeficijent se izražava kao:

$$k = 20 \log \frac{A_{\text{primljen}}}{A_{\text{emitiran}}} \quad (1)$$

gdje je A amplituda smetnje.

Što je veza između izvora i primatelja slabija ovaj je koeficijent u apsolutnoj vrijednosti veći (dakle veće je prigušenje a time i bolja EMC).

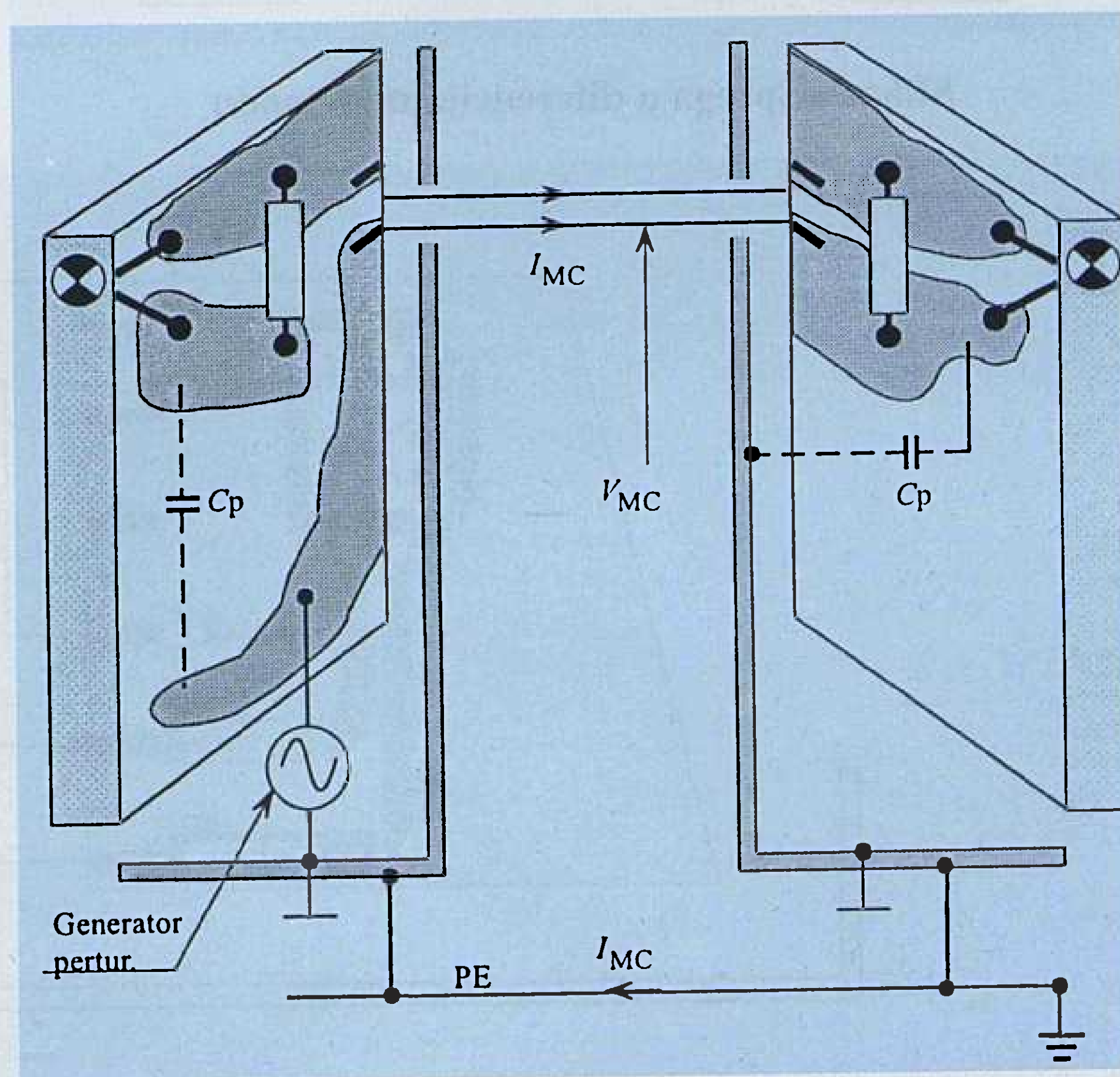
U praksi razlikujemo tri slučaja sprege:

- sprega elektromagnetskog polja i kabela, u nultom i diferencijalnom modu
- sprega preko zajedničke impedancije
- sprega između dva kabela u diferencijalnom modu (koje se ponekad zove i diafonija).

4.1. Sprega elektromagnetskog polja i kabela, u nultom i diferencijalnom modu

Elektromagnetsko polje može se vezati za bilo koju žičanu strukturu a time i energetska ili telekomunikacijski kabel, te na taj način generirati napone u takozvanom nultom modu. Nulti mod fizikalno predstavlja referentni napon prema zemlji ili masi. Isto tako, moguće je djelovanje tog polja između dviju ili više žica (žila) kabelskog (zračnog) voda. Takav učinak polja inducira napon u diferencijalnom modu (slika 2).

Sprega u nultom modu izaziva pojavu struja i napona u dotičnom modu. Tako se napon nultom modu (V_{MC}) odnosi na napon između aktivnih vodiča i mase ili zemlje. Struja u nultom modu (I_{MC}) protječe aktivnim vodičima u istom smjeru i zatvara se preko zajedničke mase, slika 1. Na slici je dan shematski prikaz dvaju releta koji se nalaze unutar metalne strukture ćelije srednjeg napona (nepravilne površine predstavljaju metalne dijelove). Udarac groma (direktni ili inducirani) prikazan na slici kao generator perturbacije, potjerat će struju (I_{MC}) koja će se vratiti preko zajedničke mase ili zemlje. Ovo je tipični primjer sprege koja se iskazuje u nultom modu, gdje se proces odvija preko parazitskih kapaciteta (C_p) i kada su naponi koji se



Slika 1. Struje i naponi u nultom modu, u jednoj ćeliji srednjeg napona

induciraju relativno visoki. Potrebno je naglasiti da je za ovu pojavu potrebno ispuniti uvjet:

$$h \gg s$$

gdje je h visina od zemlje, a s je udaljenost između vodiča.

Kao što je rečeno ova je sprega karakteristična za atmosferska pražnjenja kada se induciraju naponi visokih amplituda, koji mogu često izazvati i preskoke od aktivnih vodiča prema zemlji ili masi.

Sprega u diferencijalnom modu označava pojavu struja i napona, tipično između dviju faza. Klasičan su primjer vodiči u pomoćnim krugovima trafostanica koji povezuju mjerne i signalne krugove. Proračun sprege u diferencijalnom modu je kompleksan jer je osim modeliranja izvora smetnje nužno proračunati indukciju između dvaju (ili više njih) vodiča koji su vrlo blizu jedan drugom. Pri tome je potrebno uključiti utjecaje zemlje te uzeti u obzir

završne impedancije, na koje su priključeni vodiči. U pojednostavljenom slučaju (na primjer za bliska elektromagnetska pražnjenja) može se proračunati sprega komponente magnetskog polja i petlje koju sačinjavaju dva vodiča. Dobiva se jednostavan izraz:

$$e = \mu_0 \cdot S \cdot dH / dt \quad (2)$$

gdje je S površina petlje prikazana na slici 2.

Iako su vrijednosti ovako dobivenih napona daleko niži od onih u slučaju sprege u nultom modu, smetnje ovog tipa se šire kabelima pa mogu ugroziti osjetljivu elektroničku opremu na njenom kraju. Drugi je slučaj superponiranje ovih smetnji na signale koji se prenose telekomunikacijskim kabelima, pri čemu i veoma male amplitude smetnji mogu praviti velike probleme u prijenosu informacija.

4.2. Sprega preko zajedničke impedancije

Ovakav se tip sprege događa u slučajevima kada, kao što i samo ime kazuje, postoji zajednička impedancija preko koje se zatvara dva ili više električnih krugova. Zajednička impedancija može biti zajednička masa, uzemljivač, zajedničko povratni vodič više krugova itd.

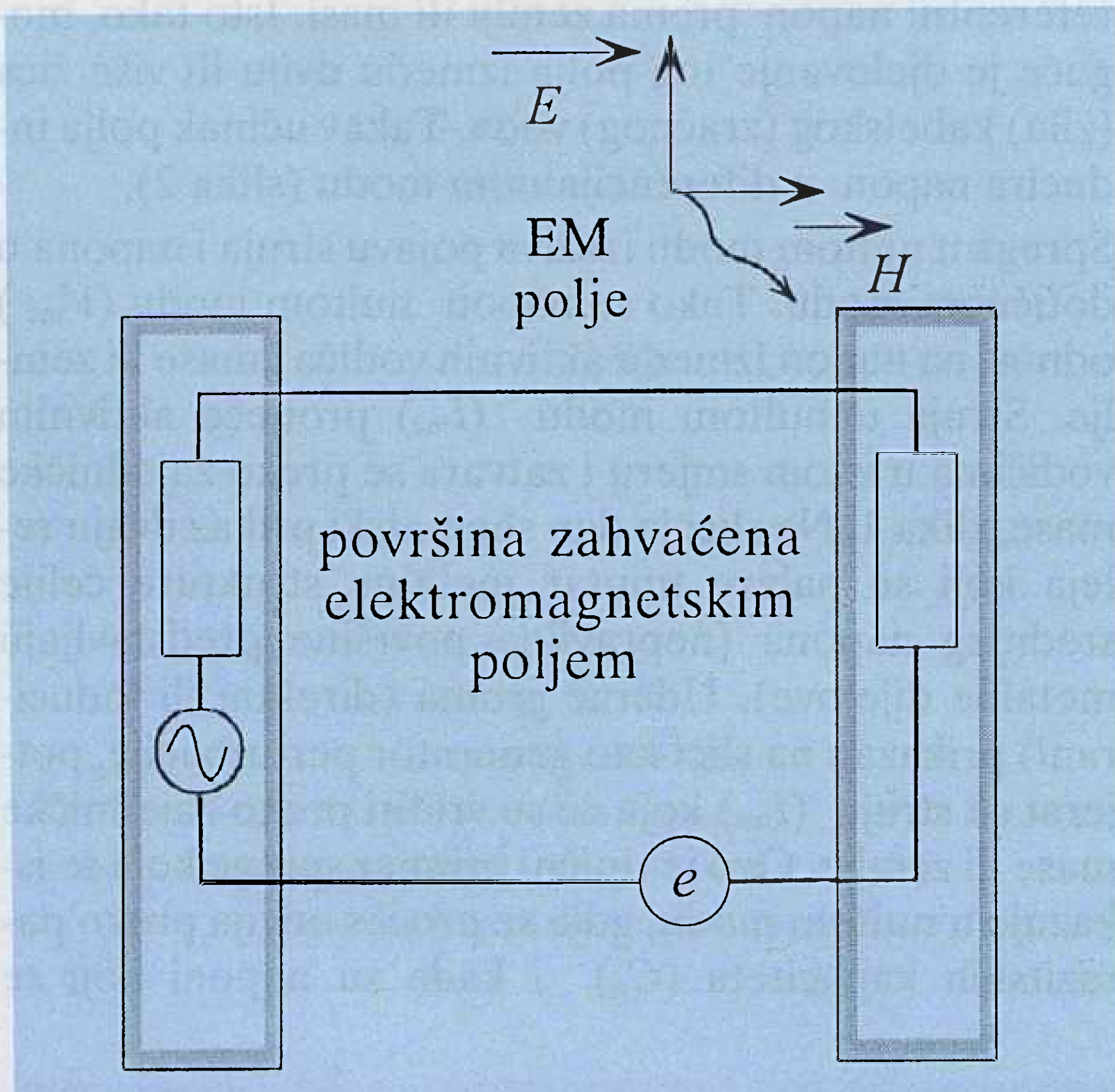
Na slici 3 prikazan je primjer koji zorno objašnjava važnost ovakve sprege. Struja smetnje u napojnom krugu A reda veličine nekoliko desetaka mA, dovoljna je da u strujnom krugu mjerenja B, izazove parazitske napone od više volti. Ukoliko uzmemo referentnu točku M u krugu B, njen će napon u tom slučaju varirati za nekoliko volti. Ovo zasigurno može izazvati smetnje u elektroničkim krugovima.

U primjeru sa slike 3 zajednička impedancija može biti često nekoliko metara zajedničkog kabela koji povezuje dva strujna kruga. U tom slučaju iznos perturbacije je

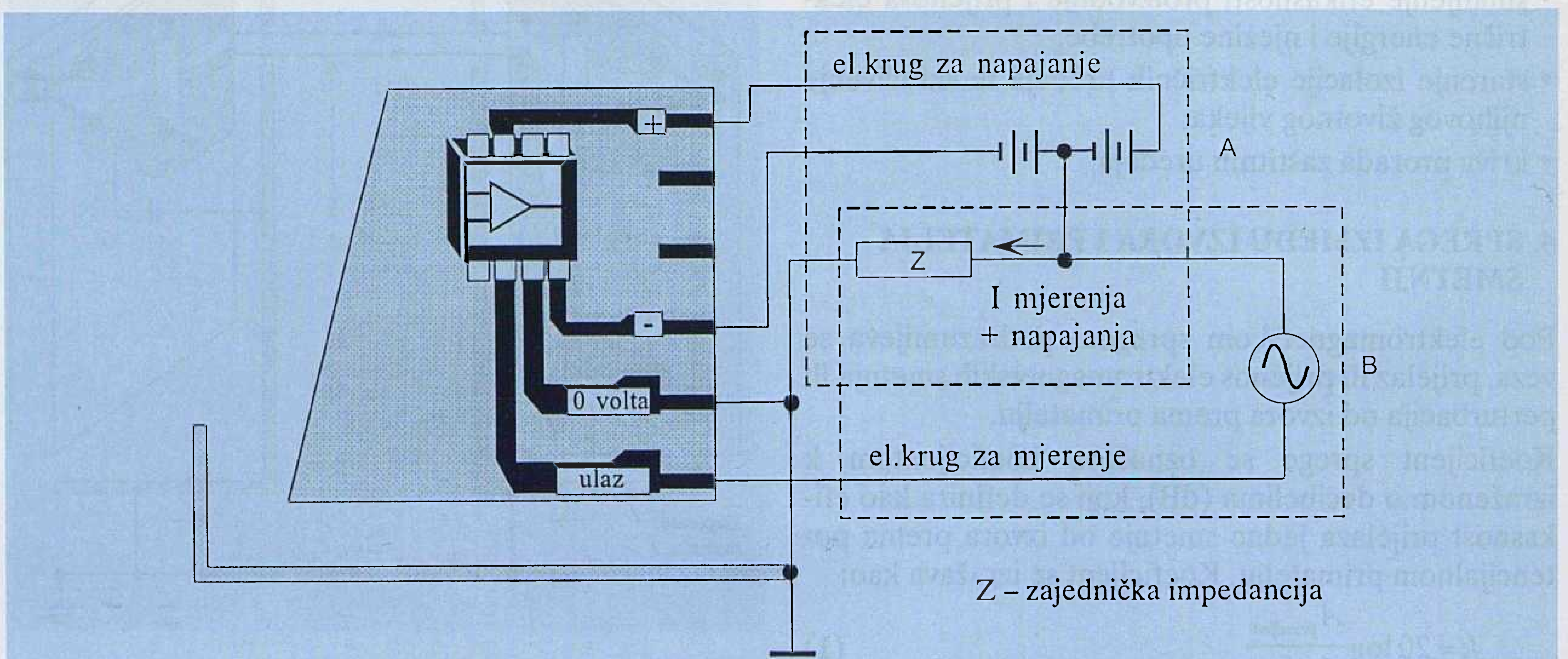
$$U_c = I_a \cdot Z_c \quad (\text{slika 4})$$

I_a : struja perturbacije

Z_c : zajednička impedancija.

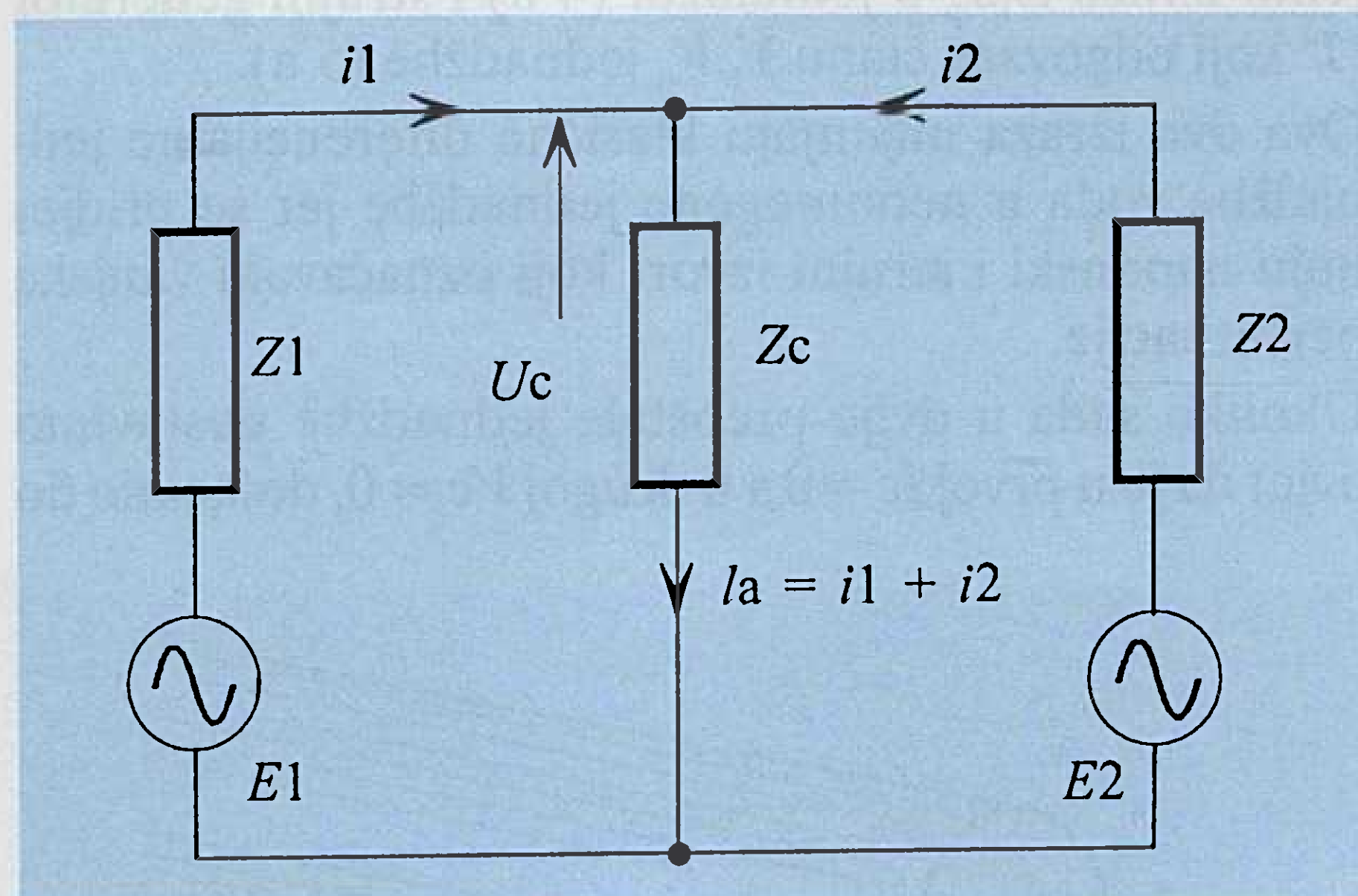


Slika 2. Sprega u diferencijalnom modu



Slika 3. Sprega preko zajedničke impedancije

Vrijednost zajedničke impedancije općenito je veoma mala na niskim frekvencijama. Pri frekvenciji mreže od 50 Hz iznos impedancije najčešće ne prelazi 1Ω . Međutim pri visokofrekventnim smetnjama ova vrijednost impedancije jako raste pa se i iznos napona perturbacije razmjerno povećava. Jedno od rješenja u svrhu eliminiranja ovih smetnji je izbjegavanje dugih zajedničkih vodiča. Druge mjere u cilju smanjenja zajedničke impedancije su polaganje vodiča na metalnu plohu dobre vodljivosti ili na metalnu rešetku.



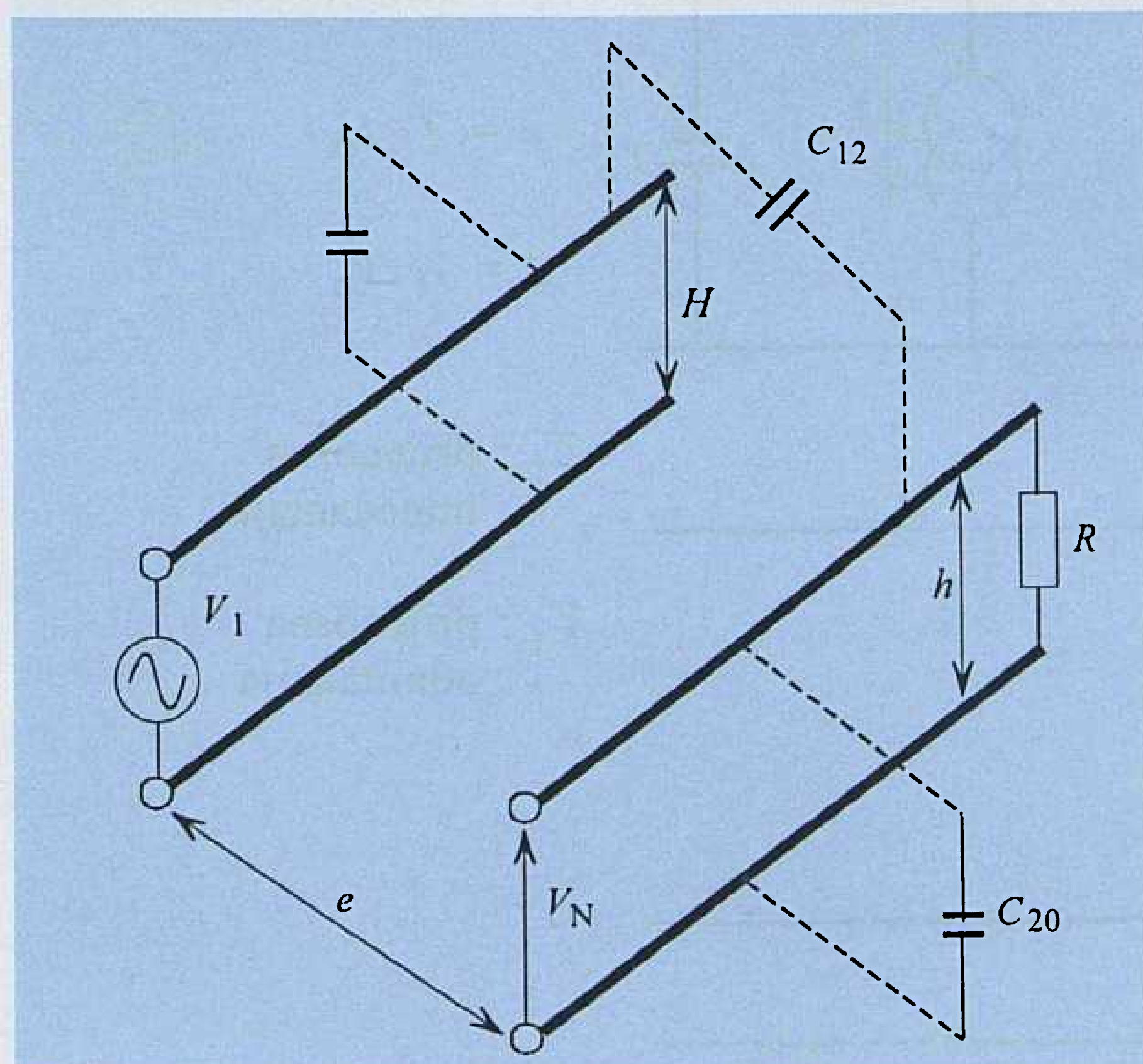
Slika 4. Ukupna struja kroz impedanciju

4.3. Sprega između dva kabela u diferencijalnom modu

Diafonija (crosstalk) je vrsta sprege koja se odvija elektromagnetskim djelovanjem jednog kabela na drugi kabal. Postoje ovisno o vrsti perturbacije:

- kapacitivna sprega
- induktivna sprega.

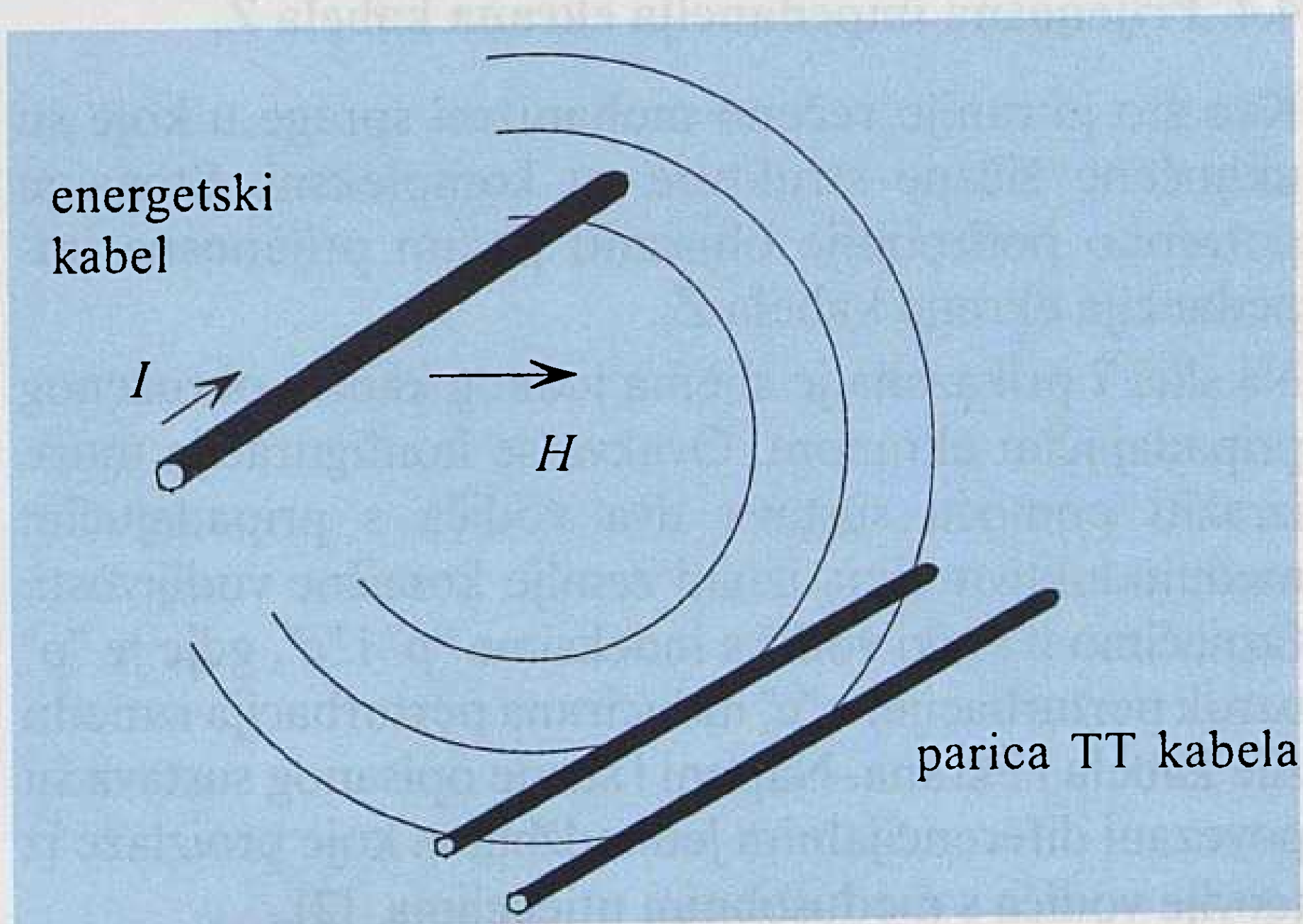
Kapacitivna sprega se odvija u slučaju nagle promjene napona, bilo između dvaju vodiča, bilo između vodiča i zemlje, kojom se prilikom formira elektromagnetsko



Slika 5. Kapacitivna sprega

polje s karakteristikama (uz određene pojednostavljene pretpostavke) električnog polja. Stvoreno polje se veže sa žičanom strukturom obližnjeg kabela, čime se postiže kapacitivna sprega. (slika 5).

Na isti način promjena struje u jednom strujnom krugu stvara elektromagnetsko polje koje se uz neka pojednostavljenja može smatrati čistim magnetskim poljem. Ovo se polje veže s drugim kablom ili zračnim vodom te inducira određeni napon. Opisana sprega se naziva induktivnom spregom (slika 6).



Slika 6. Induktivna sprega

Objе vrste sprege se pojavljuju u slučajevima kada su vodiči bliski jedni drugima odnosno kada je njihov međusobni položaj paralelan. U praksi često susrećemo takvu geometriju gdje se zajednički vode energetski i telekomunikacijski kabl, pri čemu je dužina paralelnog polaganja tih kabela te njihova blizina proporcionalna sa smetnjama koje oni mogu stvoriti. Ova će sprega biti tim jača što je i frekvencija pojave viša.

Kod kapacitivne sprege, prema oznakama na slici 5, koeficijent sprege izražen u odnosima napona primatelja i napona perturbacije (izvora) dobije se sljedeći izraz :

$$\frac{V_N}{V_1} = \frac{j2\pi \cdot f \left[\frac{C_{12}}{(C_{12} + C_{20})} \right]}{j \cdot 2 \cdot \pi \cdot f + \left[\frac{1}{R(C_{12} + C_{20})} \right]} \quad (3)$$

gdje su:

- V_1 napon izvora
- V_N inducirani napon
- C_{12} kapacitet između dva kabela, proporcionalan dužini kabela, koji se može pojednostavno izraziti kao $\log(1 + (h/e)^2)$, gdje je h međusobna udaljenost između pogodnih vodiča (zahvaćenih perturbacijom), e je udaljenost među kablom
- C_{20} je dozemni kapacitet pogodnog kabela.

Kako bi se dobio osjećaj veličine smetnji, uzevši za primjer dva kabela presjeka vodiča 0.65 mm, položeni

paralelno 10 metara, udaljenih međusobno 2 cm, odnosno 1 cm unutar jednog kabela, uz $R = 1 \text{ k}\Omega$, pri frekvenciji smetnje od 1 MHz daje koeficijent sprege od 22 dB ili razmjor 1 prema 12.

Ova su razmatranja bila provedena za slučaj ravnih vodiča, međutim u praksi se provoda razne mjere kao što su oklapanje kabela te upotreba isprepletenih kabela. Navedeni postupci omogućavaju bitno reduciranje smetnji, o čemu će biti govora u kasnijem izlaganju.

4.4. Prijenosna impedancija ekrana kabela Z_t

Kao što je ranije rečeno mehanizmi sprege u koje su uključene žičane strukture su kompleksni. Stoga je potrebno detaljnije objasniti pojam prijenosne impedancije ekrana kabela Z_t .

Na slici 7 prikazana je shema jednog kabela okruženog pripadajućim ekranom. Ovakva se konfiguracija može izraziti pomoću sustava dva vodiča s pripadajućim međuinuktivitetima iznad zemlje konačne vodljivosti. Označimo li svaki vodič s indeksima "p" i "c", gdje je "p" uzrok perturbacije, a "c" inducirana perturbacija između žile kabela i ekrana. Naponi i struje opisanog sustava su povezani diferencijalnim jednadžbama koje proizlaze iz teorije vodiča s međusobnim utjecajima [2].

$$-\frac{dV_c}{dz} = Z_c \cdot I_c - Z_t \cdot I_p \quad (a) \quad (4)$$

$$-\frac{dV_p}{dz} = -Z_t \cdot I_c + Z_p I_p \quad (b)$$

$$-\frac{dI_c}{dz} = Y_c V_c + Y_t V_p \quad (a) \quad (5)$$

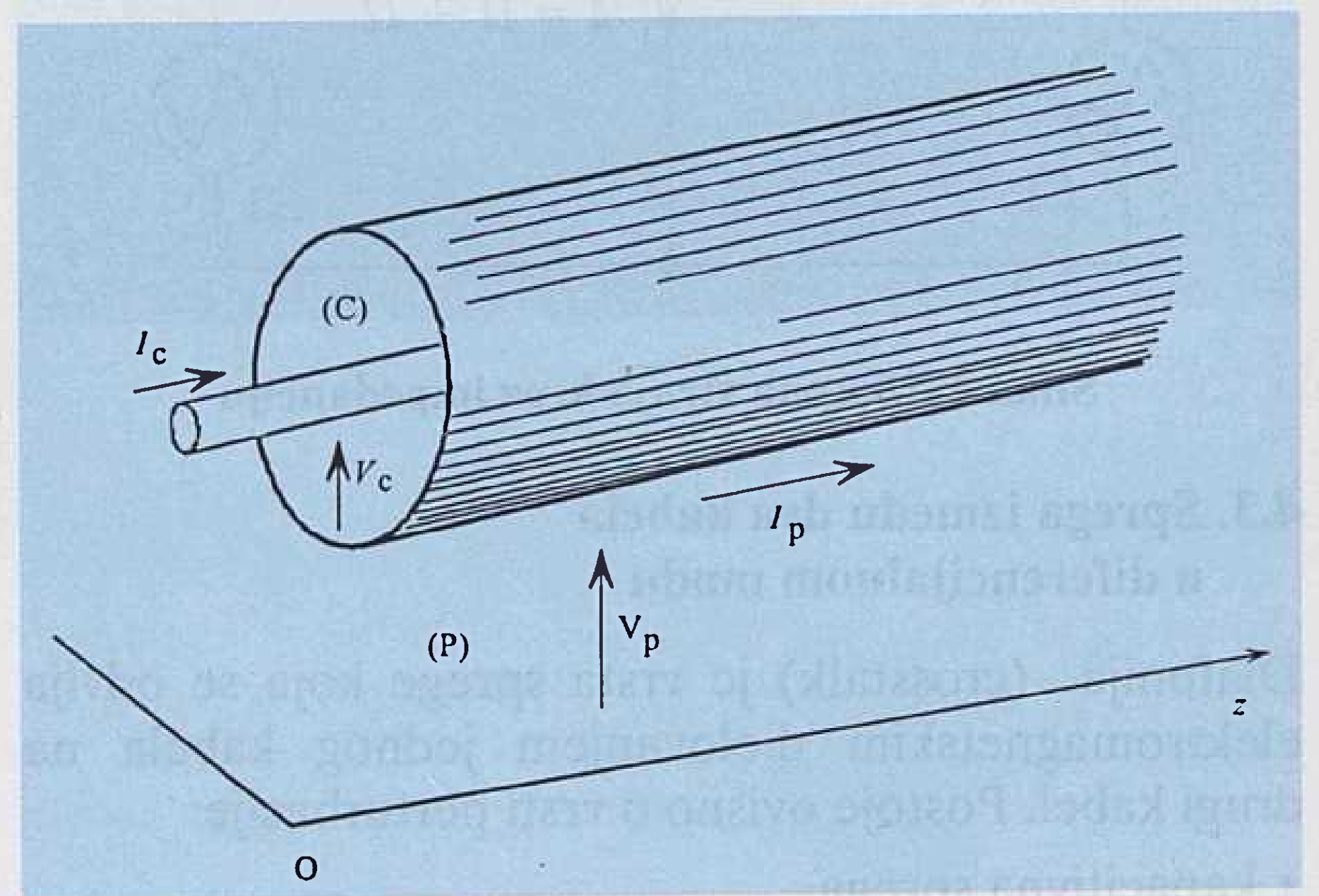
$$-\frac{dI_p}{dz} = Y_t V_c + Y_p V_p \quad (b)$$

Jedinične impedancije i admitancije ekrana i žile kabela su označene izrazima Z_c, Z_p, Y_c, Y_p , dok se izrazi Z_t i Y_t nazivaju prijenosna impedancija i prijenosna admitancija kabela, a koje daju karakteristiku elektromagnetske veze između plašta kabela i žile kabela.

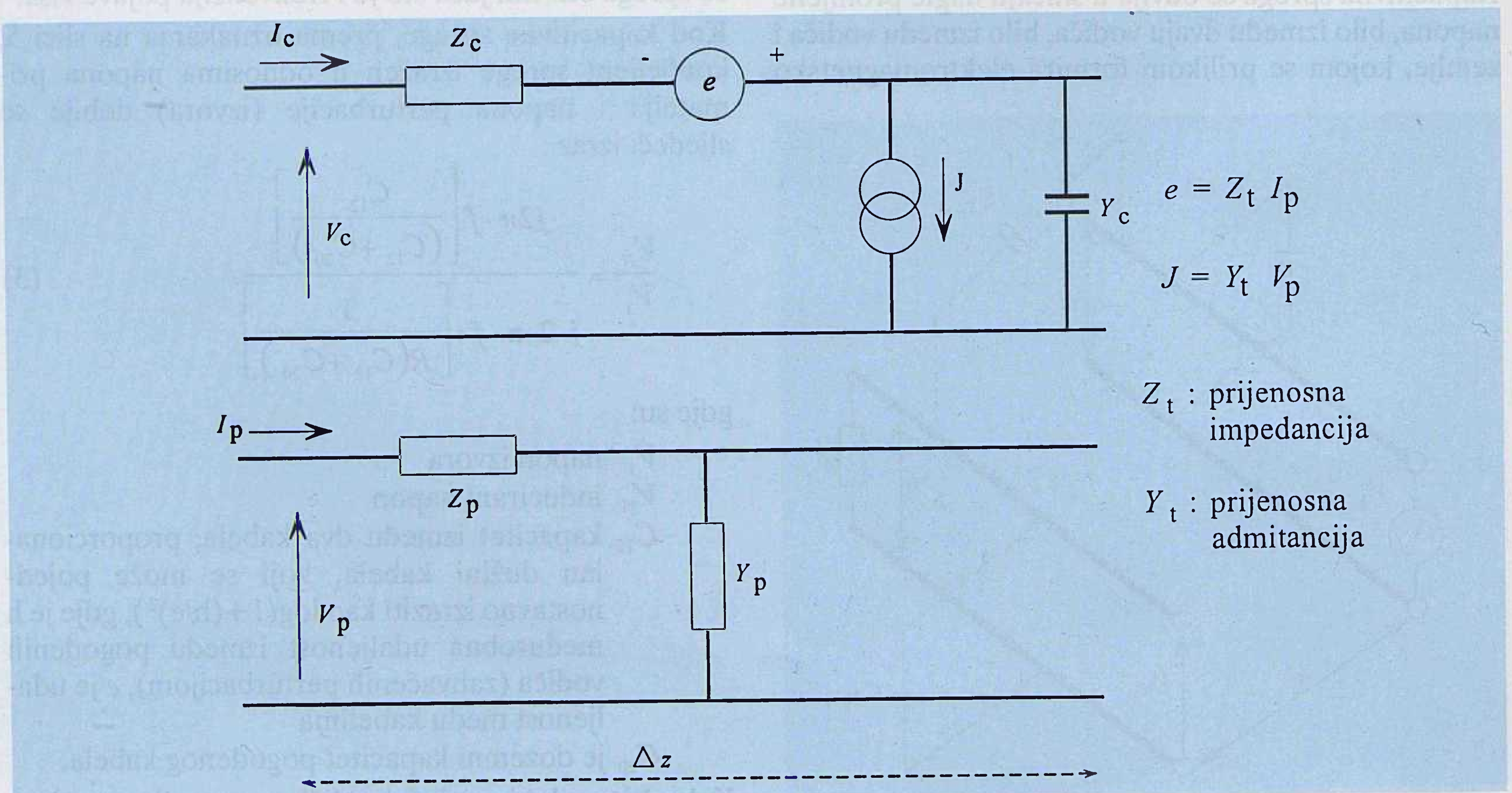
U praktičnim primjerima mogu se zanemariti izrazi 4 b i 5 b gdje se izražava reakcija žile kabela na ekran koji izaziva perturbaciju. Preostale dvije jednadžbe mogu se zorno prikazati preko shema na slici 8. Dva su izraza na slici značajna, generator napona "e" koji pridjeljujemo izrazu $Z_t I_p$ u jednadžbi (4 a) i strujni generator "J" koji odgovara članu $Y_t V_p$ jednadžbe (5 a).

Ova dva izraza mijenjaju klasične diferencijalne jednadžbe voda u nehomogene jednadžbe jer se pridjeljuju naponski i strujni izvori koji označavaju vanjske perturbacije.

Ukoliko sada u dvije preostale jednadžbe postavimo uvjet da je u prvom $I_c = 0$ a u drugom $V_c = 0$, dolazimo do



Slika 7. Shema koaksijalnog kabela



Slika 8. Shema koja prikazuje infinitezimalni dio plašta kabela (izvor smetnje) i žile kabela (primatelj smetnje)

dvije fundamentalne relacije koje definiraju prijelaznu impedanciju i admitanciju:

$$Z_t = \frac{1}{I_p} \left(\frac{dV_c}{dz} \right)_{I_c=0} \quad (6)$$

$$Y_t = \frac{1}{V_p} \left(\frac{dI_c}{dz} \right)_{V_c=0}$$

Prijelazna impedancija predstavlja dakle **efikasnost oklapanja prema struji perturbacije** I_p , dok prijenosna admitancija karakterizira tu efikasnost prema naponskom napreznju V_p .

Struja i napon perturbacije I_p i V_p ovise u praksi o impedancijama na ekstremitetima voda, koje su spojene na ekran kabela. Postoje dvije varijante:

- impedancije posjeduju niske vrijednosti, u slučaju spoja ekrana na masu, kada presudni utjecaj ima struja perturbacije I_p i stoga prijenosna impedancija prevladava
- impedancije imaju visoke vrijednosti, odnosno poprime beskonačnu vrijednost u slučaju izoliranog kabela u zraku, napon perturbacije V_p je dominantan te prevladava prijenosna admitancija.

S obzirom da su u praksi ekrani uvijek vezani za mase ili su uzemljeni, za proučavanje EMC je značajnija

prijenosna impedancija Z_t , koja direktno definira efikasnost oklopa kabela.

Efikasnost ekrana kabela ovisi o geometriji kabela kao i o njegovoj udaljenosti od ravnine zemlje ili mase. Međutim, presudan utjecaj na prijenosnu impedanciju ima izvedba ekrana koji može biti:

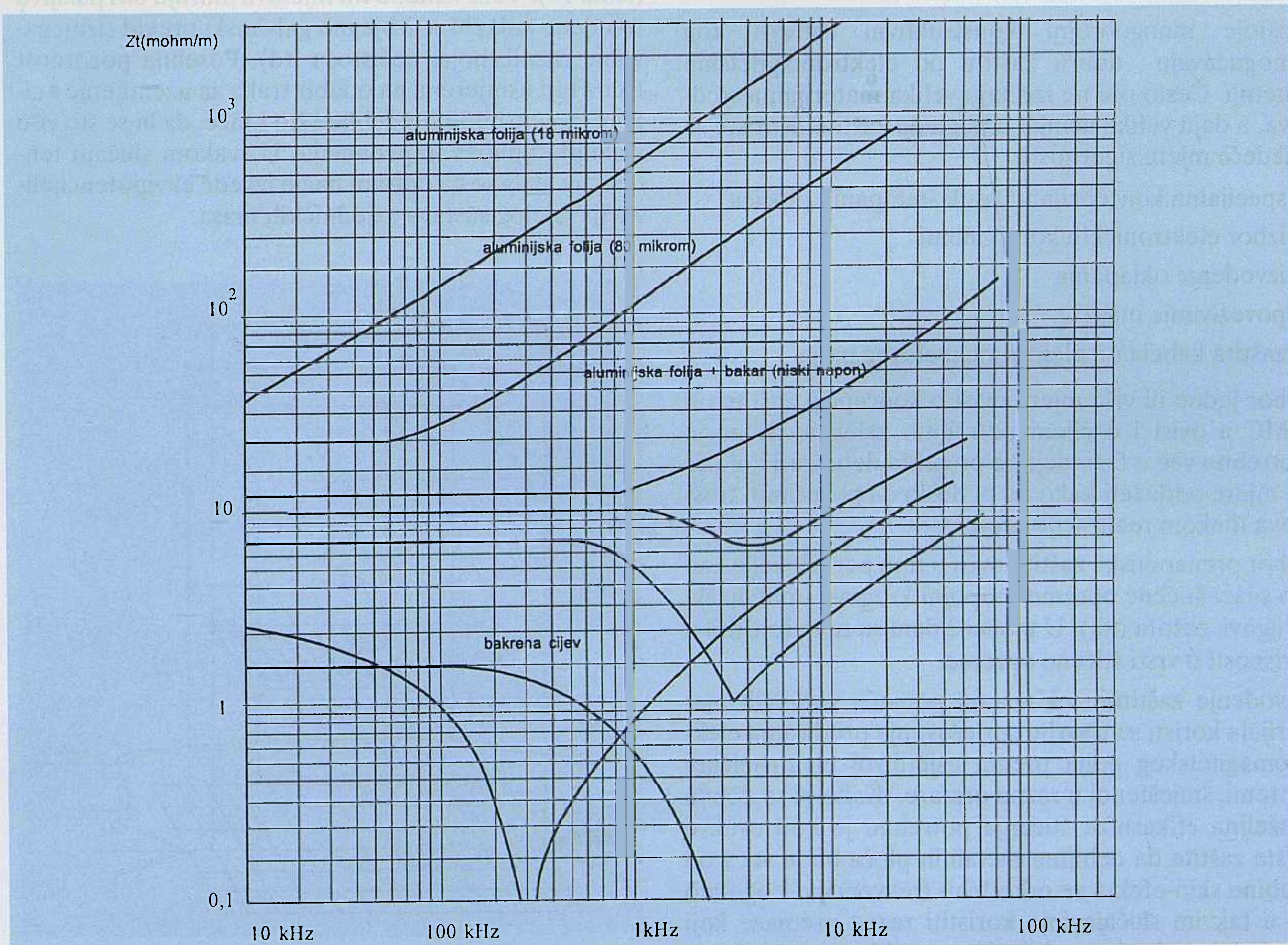
- homogen
- nehomogen, podrazumijevajući neravnine i šupljine na njegovu obodu.

Kod ekrana sačinjenih od homogenih materijala se prijenosna impedancija Z_t smanjuje porastom frekvencije, dok se kod nehomogenih materijala ona povećava. Općenito se interakcija kabela s elektromagnetskim poljem može podijeliti na tri kategorije:

- elektrostatičko polje
- magnetostatičko polje
- magnetodinamičko polje (pojava vrtložnih struja).

Od svih pojava najvažnija je ona uzrokovana magnetodinamičkim poljem, a to su međuutjecaji na srednjim i visokim frekvencijama. Stoga je materijal i vrsta ekrana veoma značajna za visinu prijenosne impedancije Z_t . Na slici 9 dane su tipične prijenosne impedancije kabela koje se koriste u energetskim postrojenjima.

Iz slike se vidi da povećanjem frekvencije rastu i prijenosne impedancije kabela (osim za slučaj homogene



Slika 9. Prijenosne impedancije kabela koje se koriste u energetskim postrojenjima

bakrene cijevi) te da je vrsta materijala i način izrade odlučujući faktor u određivanju njene vrijednosti, a time i efikasnosti oklapanja.

5. PRIMATELJI SMETNJI

Kao što je prije rečeno primatelji smetnji mogu biti bilo koji dijelovi opreme koji su podložni lošem funkcioniranju ili uništenju. Greške u radu opreme može se podijeliti u nekoliko grupa:

- stalne smetnje koje se mogu mjeriti
- greške u radu koje se ne ponavljaju, a događaju se za vrijeme perturbacija
- greške u radu koje se ne ponavljaju, a događaju se nakon perturbacija
- stalni kvar kojem je izložena oprema (uništenje elektroničkih komponenti).

Smetnje koje čine ove četiri grupe podijeljene su u ovisnosti o trajanju kvarova, međutim one ne određuju stupanj opasnosti po opremu. Taj je stupanj definiran prema izdržljivosti same opreme i sposobnosti njenog funkcioniranja u određenim okolnostima. Stoga je za svaku vrstu opreme potrebno odrediti koje su sve perturbacije opasne po njen pouzdan rad te poduzeti potrebne mjere zaštite.

Postoje mnogobrojni konstruktivni zahvati koji omogućavaju dobru zaštitu od elektromagnetskih smetnji. Često oni ne iziskuju velika materijalna sredstva, a daju velike učinke u pogledu zaštite. Koriste se sljedeće mjere sigurnosti:

- specijalna koncepcija u izradi štampanih pločica
- izbor elektroničkih komponenti
- izvođenje oklapanja
- povezivanje masa
- zaštita kabela od elektromagnetskog polja.

Izbor jedne ili više mjera ovisi o koncepciji zaštite od EMC a ovisi i o cijeni potrebnih zahvata. Stoga je potrebno već u fazi idejnog projekta definirati koje će se mjere poduzeti kako ne bi došlo da povećanih troškova tijekom realizacije projekta.

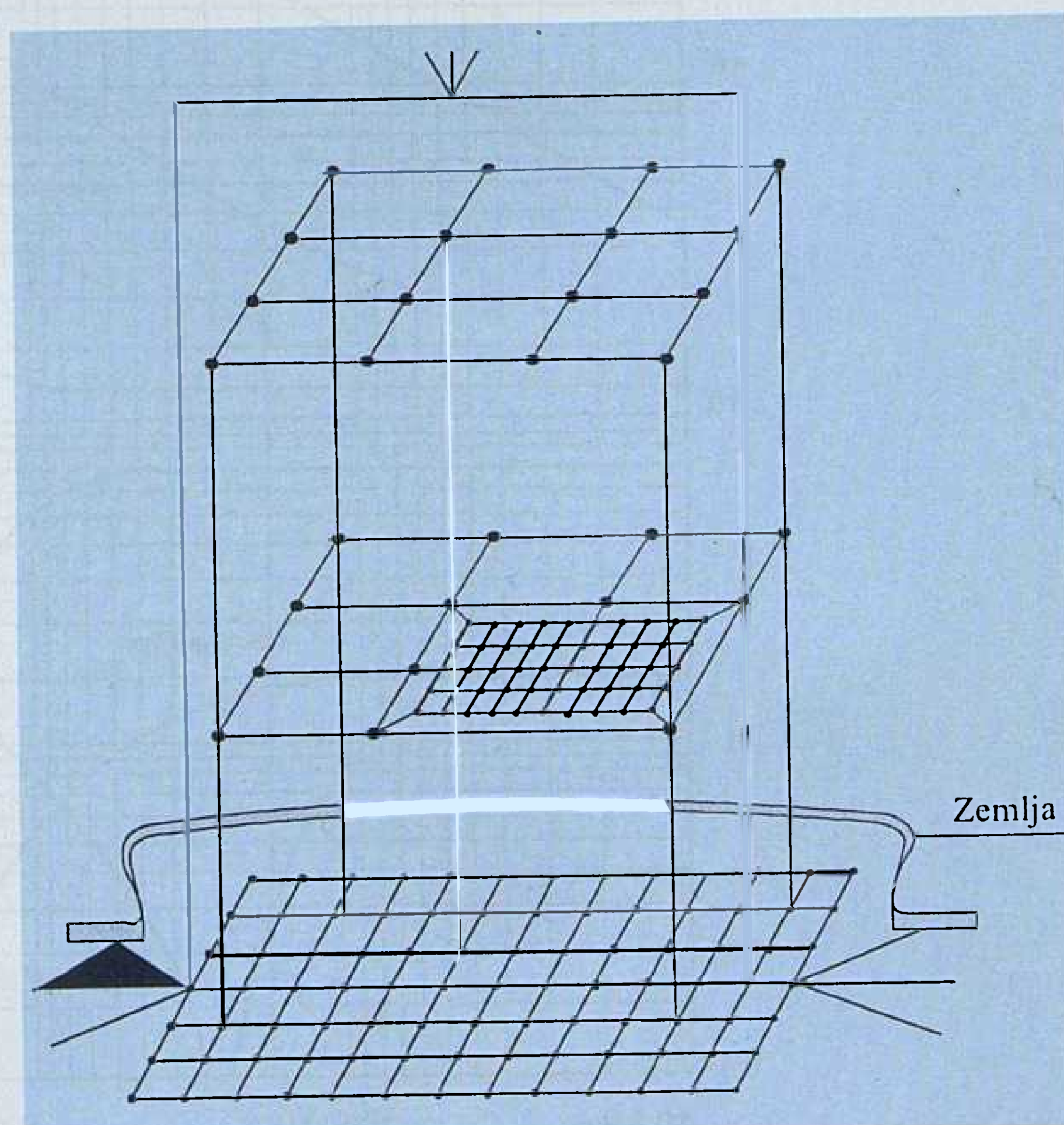
Izbor prenaponske zaštite ovisi o tipu perturbacije kao i o snazi štice opreme (napojni krugovi, upravljački krugovi, zaštita itd.). U tablici 2 dani su tipovi zaštita u ovisnosti o vrsti štice opreme.

Izvođenje zaštitnih oklapanja pomoću vodljivih materijala koristi se u svrhu sprječavanja prodiranja elektromagnetskog polja prema osjetljivoj elektroničkoj opremi, smještenoj u razne ormare. Kako bi se dobila poželjna efikasnost štice potrebno je kod ovakve vrste zaštite da debljina metalnih ploča bude veća od dubine skin-efekta za određenu frekvenciju. Pogodno je u takvim slučajevima koristiti razne premaze koji posjeduju određenu električnu vodljivost, kako bi se povećala debljina metalnog oklopa.

Tablica 2. Načini zaštite od perturbacija

| Tip | Vrste opreme | Primjena |
|--|--|--|
| zaštitni uređaji koji ograničuju amplitude prenapona | iskrište odvodnik prenapona limiteri | napojni krugovi, instalacije, uprav- ljački krugovi |
| | varistori (nelinerni otor) Zener diode | elektronički krugovi |
| filterski uređaji | transformatori induktiviteti kondenzatori filtri | napojni krugovi, upravljački krugovi, elektronički krugovi |
| komponente za oklapanja | metalne rešetke oklopljeni kabele uzemljivačke trake prstenovi za zaštitu od visokih frekvencija | prijenos informacija ormarići u trafostanicama itd. |

Povezivanje svih masa u jednoj zgradi ili postrojenju je veoma važno, u svrhu električnog kontinuiteta raznih dijelova uzemljivačkog sustava, metalnih rešetaka itd. (slika 10). Veze između tih dijelova moraju biti pažljivo izvedene kako bi se izbjegao galvanski prekid (izbjegavanje raznih boja, nečistoća itd). Posebna pozornost treba biti usmjerena na odabir traka za uzemljenje s ciljem da one budu što deblje i što kraće, da bi se što više smanjila njihova impedancija. U svakom slučaju tendencija je da se na opisani način izvede ekvipotencijalizacija cijelog sustava zajedničkih masa.



Slika 10. Mreža uzemljivačkog sustava

6. PROVEDBA MJERA VEZANIH ZA EMC

U provedbi mjera kojima se nastoje smanjiti razni elektromagnetski utjecaji dva su najvažnija faktora:

- izbor opreme
- način izvedbe instalacija.

Prvi faktor se tiče izbora opreme koja u isto vrijeme može biti i izvor i primatelj smetnji. Ukoliko na primjer dva uređaja moraju funkcionirati jedan pored drugog trebaju zadovoljiti jedan od kriterija:

- ili odabrati uređaj koji izaziva relativno niske smetnje (izvor) u blizini drugog uređaja koji je srednje osjetljiv (primatelj)
- ili odabrati uređaj koji izaziva srednju razinu smetnji u okolišu kojeg radi robustan uređaj s niskom osjetljivošću
- odabrati kompromisno rješenje između dva gore navedena.

Drugi faktor koji se tiče načina izvedbe instalacija, ovisi o prvom faktoru, a svrha mu je da se poznavajući karakteristiku opreme izvede instalacija tako da se poštuju zahtjevi prema EMC. Naravno da ova faza projekta mora uzeti u obzir cijenu opreme kao i potrebnih radova.

Realizacija različitih elemenata električne instalacije sastoji se od mjera koje su već spomenute, a mogu se svesti na sljedeće tehnike:

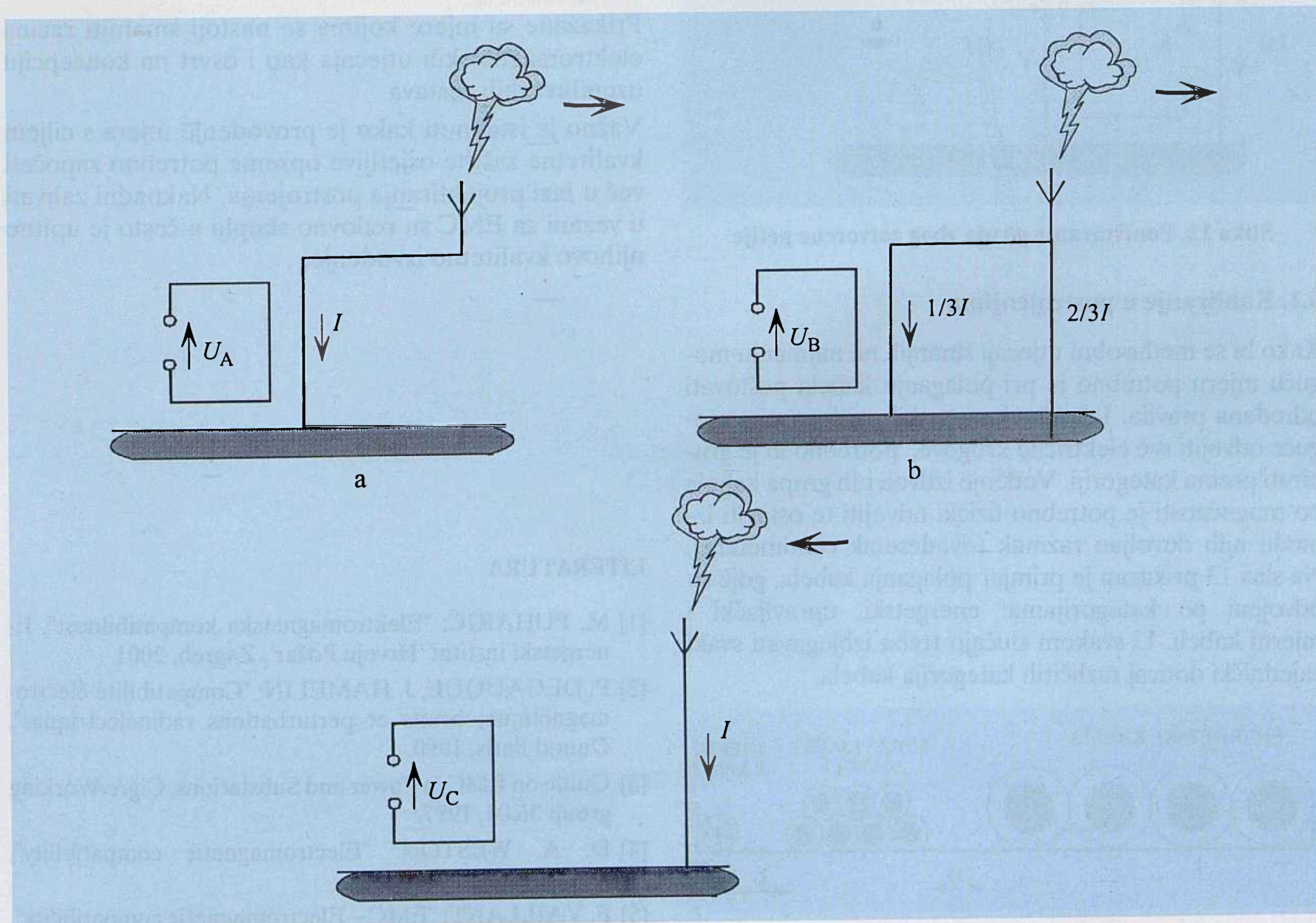
- umreženje električnih krugova i masa s zemljom
- odvajanje električnih krugova
- oklapanje električnih kabela.

Općenito se koncepcija uzemljivačkog sustava i način polaganja kabela može odrediti pomoću pravila od kojih su najvažnija:

1. Sustav uzemljenja mora biti što je moguće više umrežen s tendencijom povećanja grana uzemljivačkog sustava uz istovremeno smanjenje njihova presjeka.
2. Reducirati površinu petlji u električnim – električnim krugovima (efekt elektromagnetske indukcije).
3. Signalne uzemljene krugove postaviti blizu uzemljivačkih vodiča s ciljem smanjenja prijenosne impedancije.
4. Izbjegavati blisku instalaciju signalnih i uzemljivačkih vodiča u slučajevima kada provode struje bitno različitih amplituda.

Zadnje dva pravila mogu na prvi pogled biti kontradiktorna. Međutim ukoliko se radi o instalacijama gdje pojava visokih struja groma ima veliku vjerojatnost potrebno je pažljivo sagledati ovaj problem. Naime, u tom je slučaju efekt smanjenja prijenosne impedancije zanemariv prema induktivnom utjecaju koji proizvodi visoka struja groma.

Na slici 11 dane su razne sheme koje zorno pokazuju kako se smanjuju utjecaji prolaska visokih struja at-



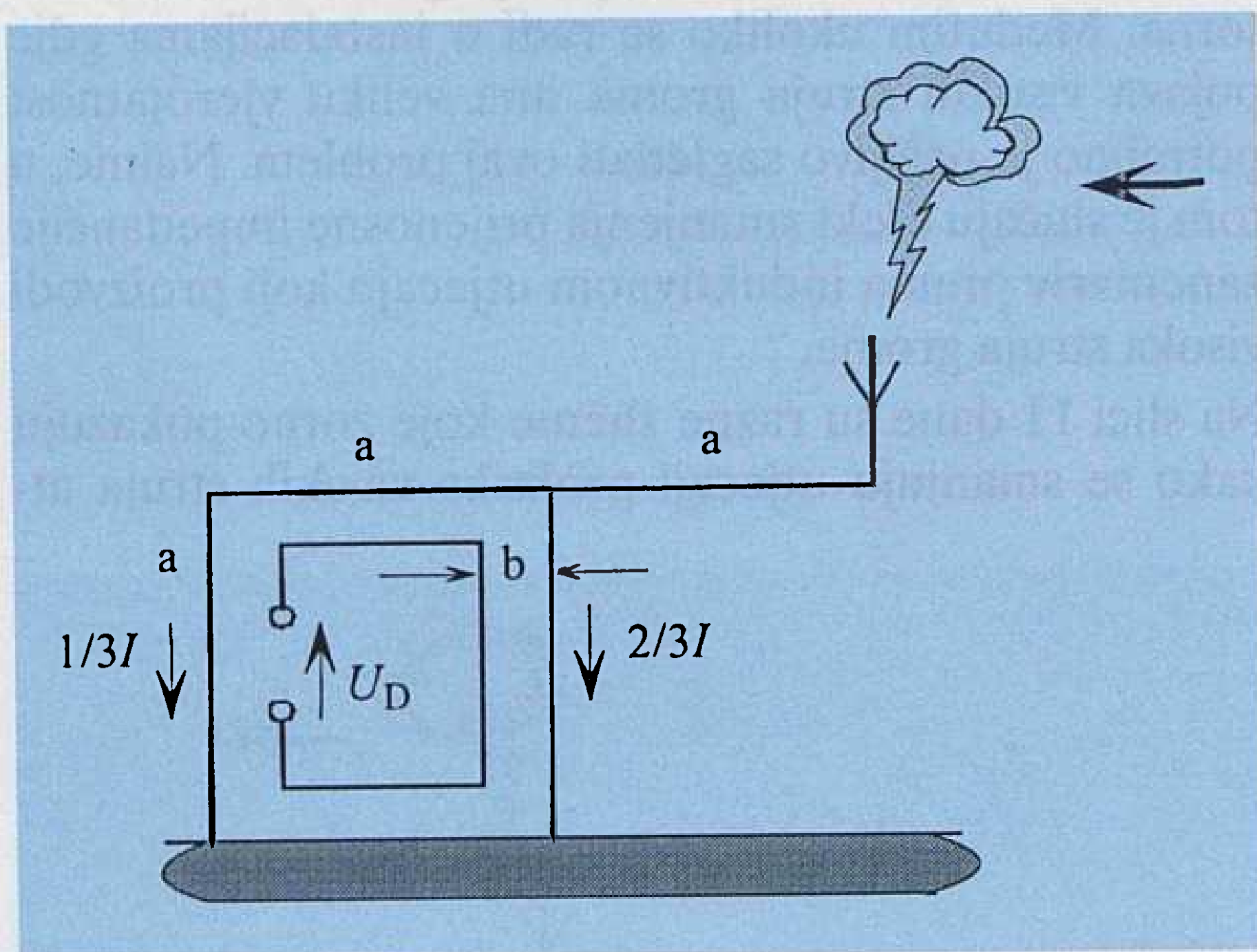
Slika 11. Smanjenje utjecaja zbog prolaska struja groma

mosferskih pražnjenja na osjetljive signalne ili zaštitne krugove. Prikazane su sljedeće sheme:

- na slici a) osjetljivi krug instaliran je u blizini uzemljivačkog vodiča
- na slici b) struja groma je odvedena direktno u zemlju, čime je u dijelu instalacije koja je bliska signalnim krugovima njen intezitet smanjen
- slika c), osjetljivi potrošači su na sigurnoj udaljenosti od uzemljivačke instalacije.

Uspoređujući ove tri sheme dolazi se do zaključka da će se smetnja smanjivati od a) prema c).

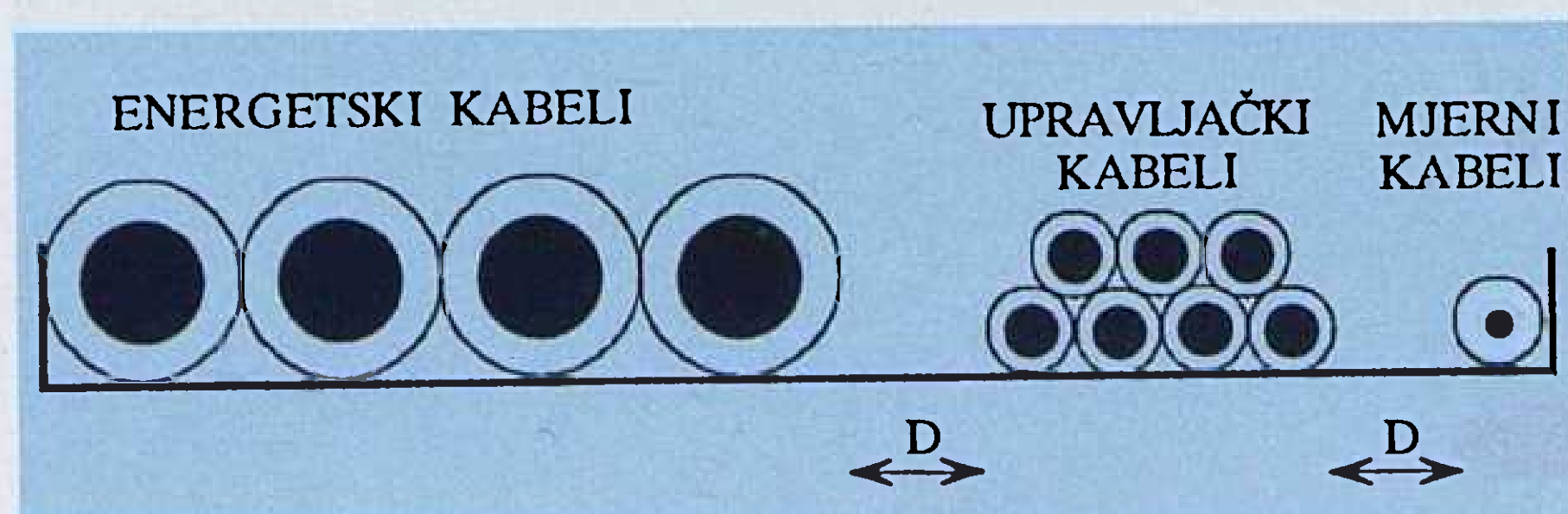
Međutim često nailazimo na instalacije kao na slici 12. Važno je istaknuti fizikalno objašnjenje za ovu shemu, gdje je osjetljivi krug postavljen kompletno unutar uzemljivačkog sustava. U ovom se slučaju dobivaju minimalne smetnje iako teku visoke struje u neposrednoj blizini. Ovo se objašnjava time što se elektromagnetsko polje poništava (struje groma teku u istom smjeru) unutar zatvorene petlje.



Slika 12. Poništavanje struja zbog zatvorene petlje

6.1. Kabliranje u postrojenjima

Kako bi se međusobni utjecaji smanjili na najmanju moguću mjeru potrebno je pri polaganju kabela poštovati određena pravila. Iako iz ekonomskih razloga nije moguće odvojiti sve električne krugove, potrebno ih je grupirati prema kategoriji. Vođenje izdvojenih grupa kabela po mogućnosti je potrebno fizički odvojiti te ostaviti između njih dovoljan razmak (dvadesetak centimetara). Na slici 13 prikazan je primjer polaganja kabela, gdje su odvojeni po kategorijama: energetska, upravljački i mjerni kabeli. U svakom slučaju treba izbjegavati svaki zajednički doticaj različitih kategorija kabela.



Slika 13. Pravilan razmještaj kabela unutar jednog rova

Kod prijenosa informacija veoma je važno da se utjecaji na telekomunikacijske kabele smanje na sigurnu razinu. Pri tome je izbor parova kabela (tzv. parice) presudan jer se korištenjem **prepletenih žila** značajno smanjuje elektromagnetska sprega između energetska i telekomunikacijskih kabela.

Kabeli mjernih krugova bi trebali biti s ekranom, koji se treba povezati s masom na određeni minimalni broj točaka.

Što se tiče pregrada koje dijele razne kategorije kabela, poželjno je korištenje metalnih struktura.

Sve gore navedene mjere potrebno je predvidjeti već pri razradi koncepcije električnih instalacija jer su troškovi vezani za njih relativno mali. Svako kasnije modificiranje postojeće instalacije će biti puno skuplje, jer iziskuje niz nepredviđenih zahvata i često dovodi u pitanje tehno-ekonomsku isplativost projekta.

7. ZAKLJUČAK

Pomoćni strujni krugovi su osjetljivi na perturbacije koje se stvaraju u visokonaponskim postrojenjima ili se preko tog sustava mogu dovesti u trafostanicu (atmosferski prenaponi). Sve veća uporaba elektronike dovodi do potrebe njene efikasne zaštite kao i proučavanja mehanizama koji je mogu ugroziti. U članku su navedeni glavni uzročnici smetnji kao i njihovi primatelji.

Prikazane su mjere kojima se nastoji smanjiti razina elektromagnetskih utjecaja kao i osvrt na koncepciju uzemljivačkih sustava.

Važno je istaknuti kako je provođenje mjera s ciljem kvalitetne zaštite osjetljive opreme potrebno započeti već u fazi projektiranja postrojenja. Naknadni zahvati u vezani za EMC su redovno skuplji a često je upitno njihovo kvalitetno izvođenje.

LITERATURA

- [1] M. PUHARIĆ: "Elektromagnetska kompatibilnost", Energetski institut 'Hrvoje Požar', Zagreb, 2001
- [2] P. DEGAUQUE, J. HAMELIN: "Compatibilité électromagnétique; bruits et perturbations radioélectriques", Dunod Paris, 1990.
- [3] Guide on EMC in Power and Substations, Cigre Working group 36.04, 1997.
- [4] D. A. WESTON: "Electromagnetic compatibility", Dekker, 1991.
- [5] F. VAILLANT: "EMC – Electromagnetic compatibility", tehnička brošura, 1991.

ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY IN ELECTRIC ENERGY STATIONS

Electric energy stations, which include all types of production plants, transformer stations, control stations as well as the entire electrical network, are becoming more complex, and thus the standards defining their operation more demanding. Electro-magnetic compatibility is a relatively new discipline that studies the interaction between a disturbance source and the recipient, i.e. disturbances on appliances because of reciprocal electromagnetic influences.

Electromagnetic Compatibility (EMC), defined as the ability of appliance, equipment or system to react acceptably within its electromagnetic surrounding without emitting disallowed disturbances into the environment, presumes the knowledge of mechanisms that cause interaction between the source and the recipient. In this paper basic ideas and laws that lead to the interrelation of influences as well as measures for their suppression are stated.

ELEKTROMAGNETISCHES ZUSAMMENPASSEN IN ELEKTROENERGETISCHEN ANLAGEN

Elektroenergetische Anlagen aller Arten von Kraftwerken und Umspannerwerken sowie Lastverteiler und der gesamte Netz inbegriffen, werden immer mehr verwickelt, weshalb auch die deren Betrieb bestimmende Verordnungen immer anspruchsvoller. Das elektromagnetische Zu-

sammenpassen ist eine verhältnismässig neue Lehre, welche sich mit Gegenwirkungen der Störungs -erzeugern und -empfängern auseinandersetzt, beziehungsweise die durch gegenseitige elektromagnetische Einflüsse verursachte Störungen an Geräten erforscht.

Begriffen als Vermögen eines Gerätes, einer Ausrüstung, oder eines Systems auf zufriedenstellende Weise in seine elektromagnetische Umgebung zu wirken, das elektromagnetische Zusammenpassen (nach englischem EMC = Elektromagnetic Compatibility) erzielen heisst Zusammenhänge gegenseitig wirkender Sender und Empfänger erkennen. Deshalb sind im Artikel Grundbegriffe und Gesetzmässigkeiten der zum gegenseitigen Wirken führenden Erscheinungen, und die dagegenwirkenden Massnahmen beschrieben.

Naslov pisca:

Dr. sc. Milan Puharić, dipl. ing.
Institut "Hrvoje Požar"
Savska cesta 163
10000 Zagreb, Hrvatska

Uredništvo primilo rukopis:
2002-04-09.

MINISTARSTVO ZNANOSTI I TEHNOLOGIJE

Temeljem članka 42. stavka 6. Zakona o znanstvenoistraživačkoj djelatnosti ("Narodne novine", broj 59/96 - pročišćeni tekst), Ministar znanosti i tehnologije donosi

PRAVILNIK

O PRESTANKU VAŽENJA PRAVILNIKA O MJERILIMA VREDNOVANJA ČASOPISA I PUBLIKACIJA S MEĐUNARODNO PRIZNATOM RECENZIJOM, KAO I S NJIMA PO VRSNOĆI IZJEDNAČENIH ČASOPISA I PUBLIKACIJA

Članak 1.

Pravilnik o mjerilima vrednovanja časopisa i publikacija s međunarodno priznatom recenzijom, kao i s njima po vrsnoći izjednačenih časopisa i publikacija ("Narodne novine", 2/1997), prestaje važiti danom stupanja na snagu ovoga Pravilnika.

Članak 2.

Ovaj Pravilnik stupa na snagu osmoga dana od dana objave u "Narodnim novinama".

Klasa: 640-01/02-07/3

Urbroj: 533-02/236-0-1

Zagreb, 17. travnja 2002.

Ministar znanosti i tehnologije

prof. dr. sc. Hrvoje Kraljević, v. r.