



Fakultet elektrotehnike i računarstva
Zavod za elektroničke sustave i obradbu informacija

5. Posebni zahtjevi i smjernice za projektiranje tiskanih pločica u elektroničkim uređajima

M. Cifrek, H. Džapo
ak.god. 2010/2011

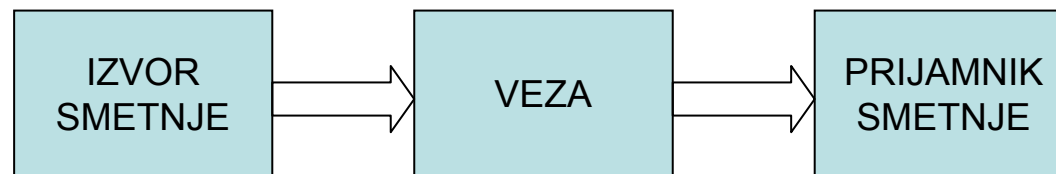
Računalom podržano projektiranje elektroničkih uređaja

Pregled tema

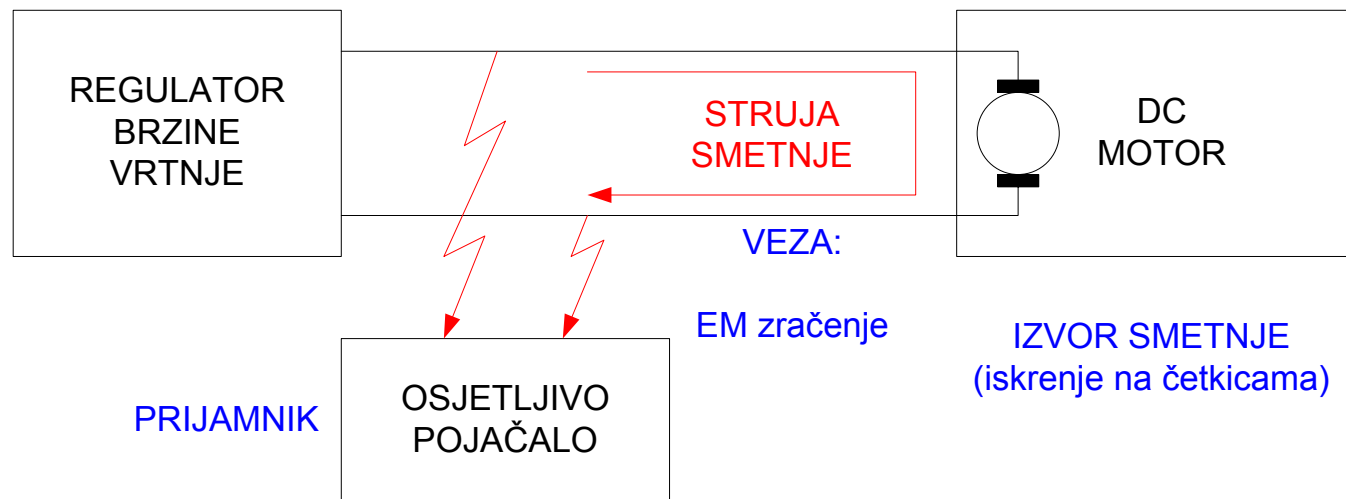
- pregled tema:
 - uzemljenje i napajanje,
 - elektromagnetske smetnje i oklapanje,
 - integritet signala,
 - elektromagnetska kompatibilnost.

Elektromagnetske smetnje

- **smetnja** = neželjeni signal superponiran korisnom signalu



- primjer:

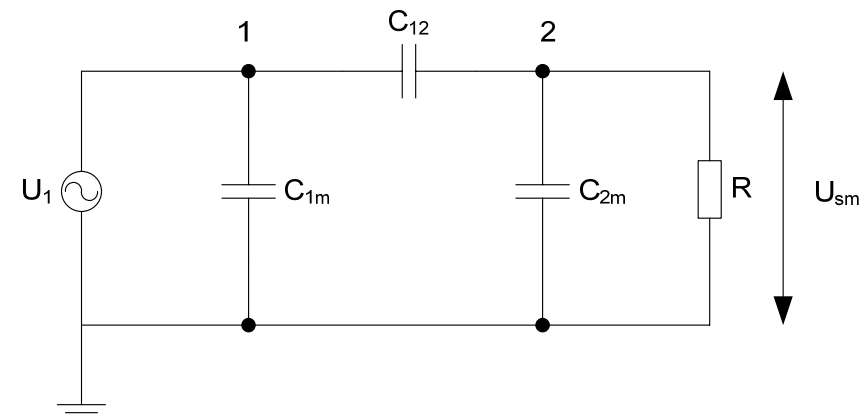
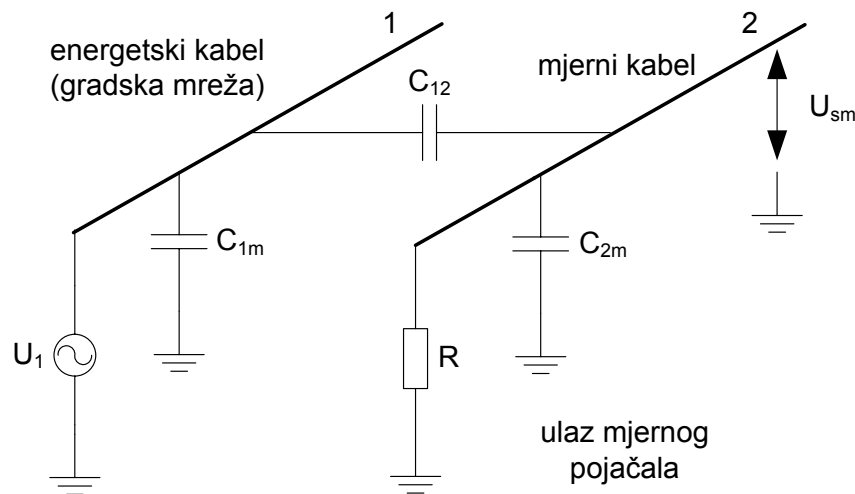


Elektromagnetske smetnje

- analiza smetnji:
 - izvor smetnje (*source*):
 - izvan uređaja,
 - unutar uređaja,
 - način prijenosa smetnji (*coupling*):
 - elektromagnetsko polje (*radiated*),
 - električno / magnetsko polje (NF),
 - elektromagnetski val (VF),
 - zajednička impedancija (*conducted*),
 - prijemnik smetnje (*victim*):
 - ulaz mjernog pojačala,
 - vodovi unutar uređaja,
 - komponente.

Smetnje uslijed električnog polja (NF)

- **tipični izvor:** vodovi napajanja gradske mreže
- primjer: smetnja nastala izvan uređaja (gradska mreža), koja je putem električnog polja (kapacitivno) spregnuta na ulaz mjernog pojačala,
- nadomjesna shema s koncentriranim parametrima (NF aproksimacija):

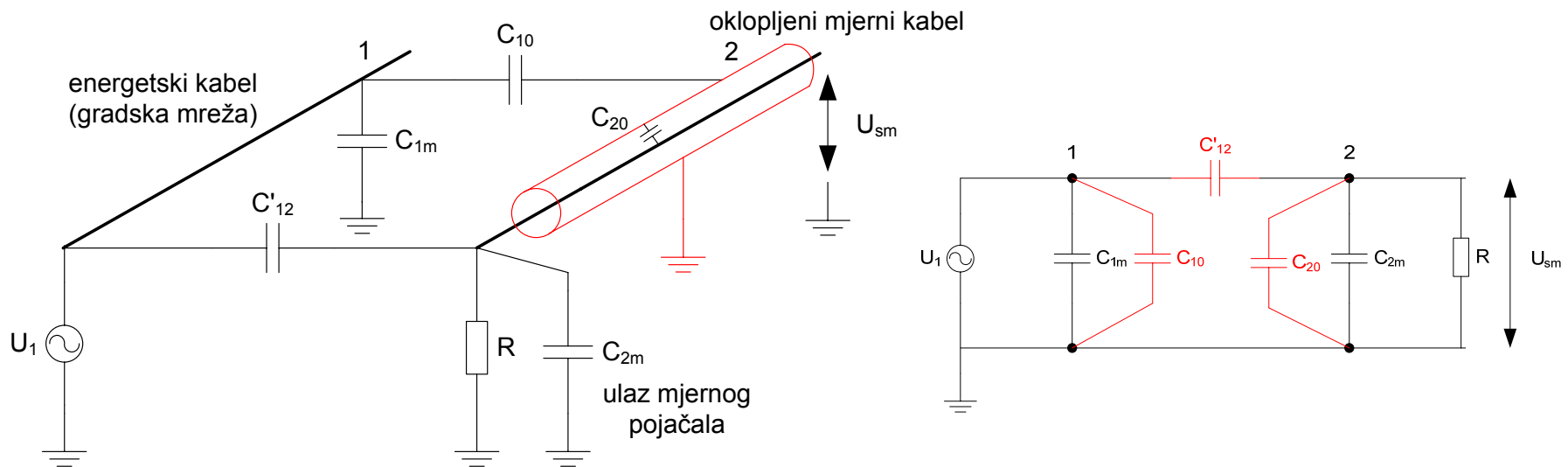


$$U_{sm} = \frac{R \parallel \frac{1}{j\omega C_{2m}}}{\frac{1}{j\omega C_{12m}} + R \parallel \frac{1}{j\omega C_{2m}}} \cdot U_1$$

- na NF ($R \ll X(C_{12} + C_{2m})$): $\omega \uparrow \Rightarrow U_{sm} \uparrow$
- na VF ($R \gg X(C_{12} + C_{2m})$): $U_{sm} = \text{konst}$
(kapacitivno djelilo!)

Smetnje uslijed električnog polja (NF)

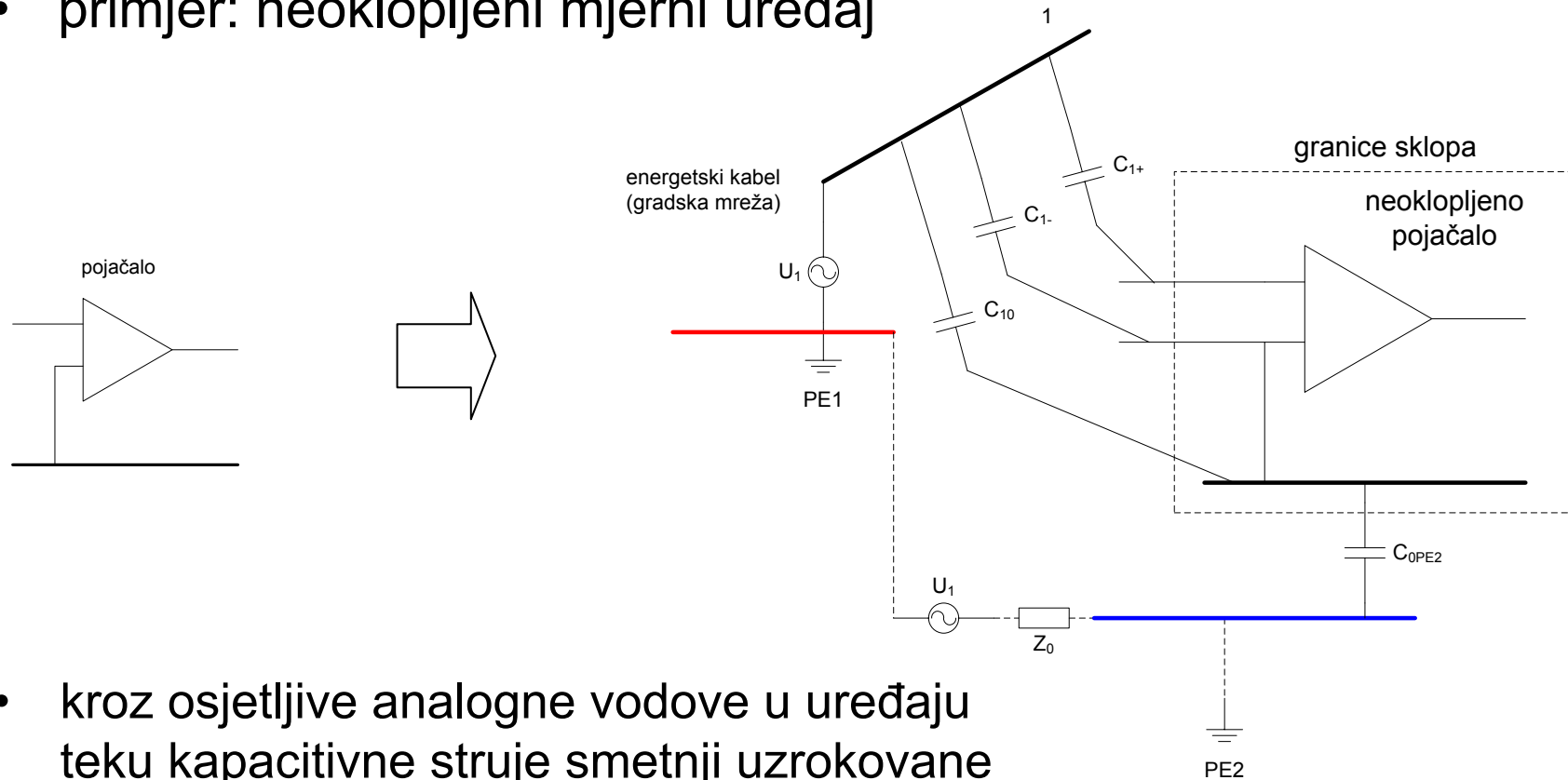
- smanjenje utjecaja smetnji uslijed električnog polja – **oklapanje** mjernog kabela:



- na niskim frekvencijama utjecaj smetnji električnog polja može se razmatrati odvojeno od magnetskih smetnji

Elektrostatsko oklapanje uređaja (*shielding*)

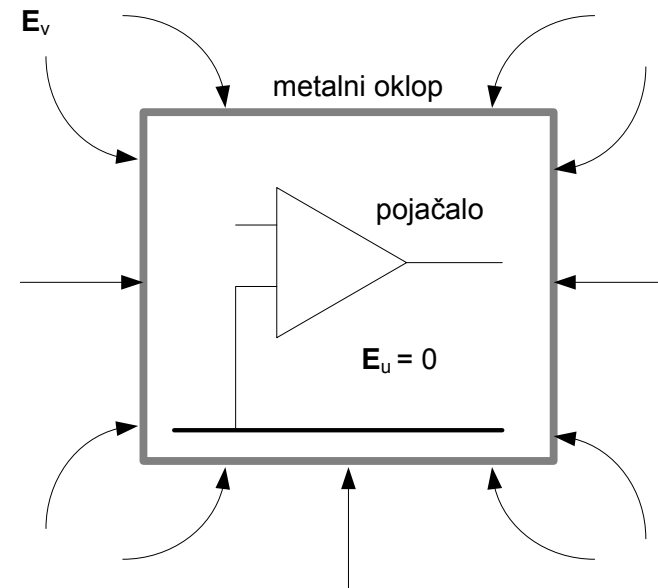
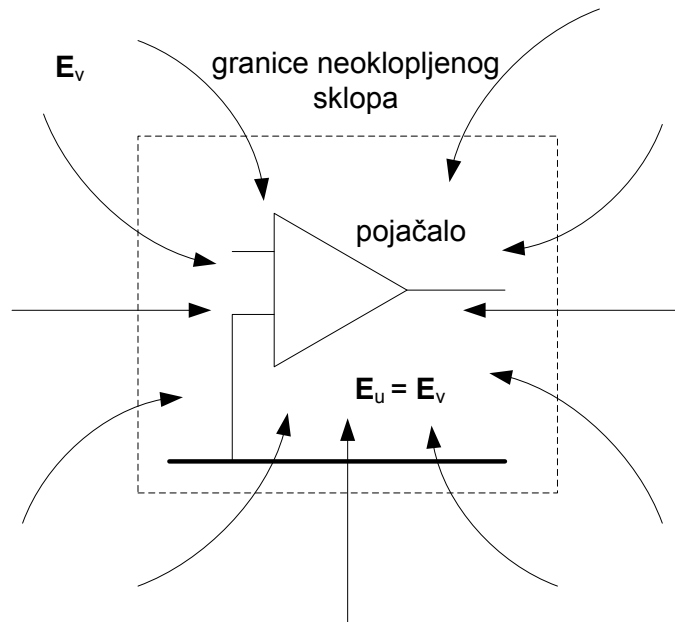
- primjer: neoklopljeni mjerni uređaj



- kroz osjetljive analogne vodove u uređaju teku kapacitivne struje smetnji uzrokovane vanjskim električnim poljem!

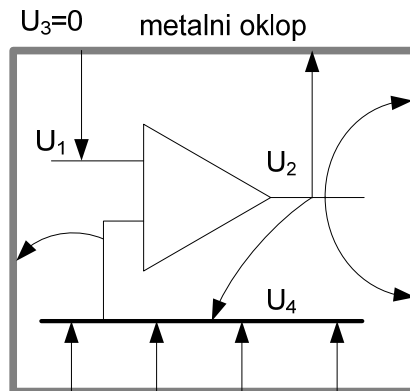
Elektrostatsko oklapanje uređaja

- **oklapanje:** sve silnice vanjskog električnog polja završavaju na **metalnom kućištu** (naboj može postojati samo na vanjskoj površini metala, a unutar Faradeyevog kaveza električno polje je jednako nuli)
- odvajanje sklopovlja od vanjskih izvora elektrostatskih smetnji



Elektrostatsko oklapanje uređaja

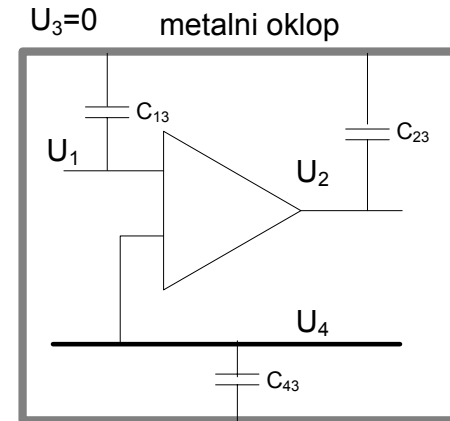
- **problem:** oklapanjem uređaja se ne eliminira utjecaj **unutarnjih** izvora električnog polja u sklopu!
- neuzemljeni, potpuno oklopljeni elektronički sklop:



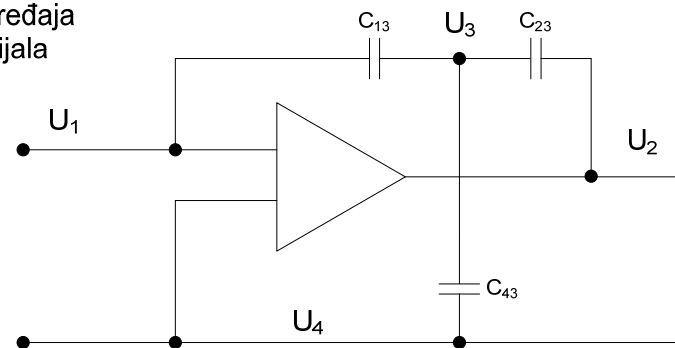
silnice električnog polja unutar uređaja
(uzrokovane razlikama potencijala
unutar sklopa)

važno:

potencijal oklopa ($U_3=0$) različit je
od potencijala zajedničke točke
sklopa (U_4)!



rasipni kapaciteti



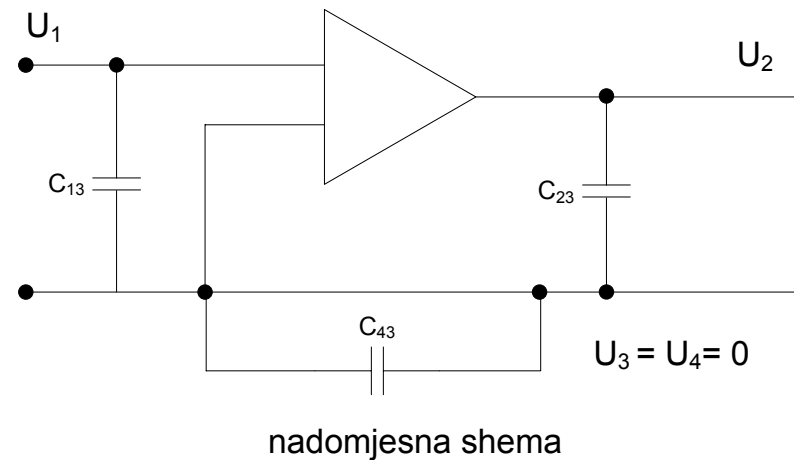
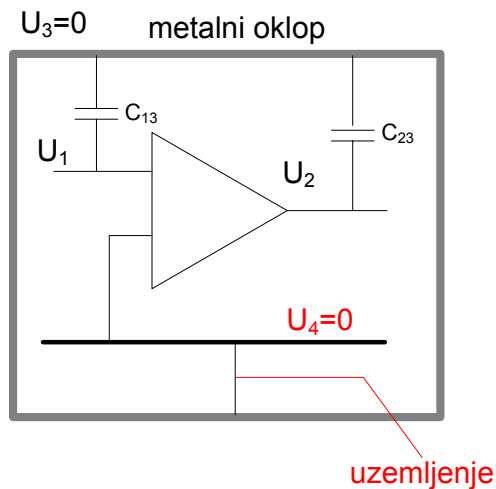
nadmjesna shema

javlja se niz **parazitnih**
kapacitivnih povratnih veza u
sklopu!

Računalom podržano projektiranje elektroničkih uređaja

Uzemljenje sklopa (*grounding*)

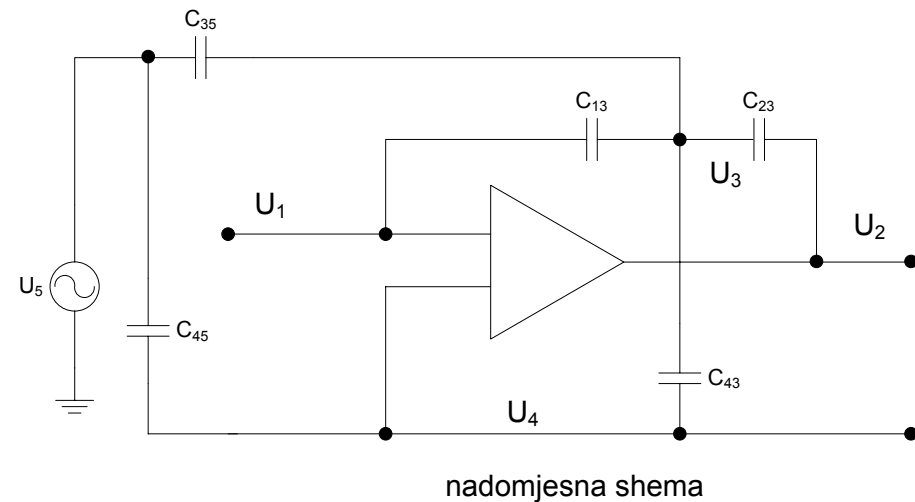
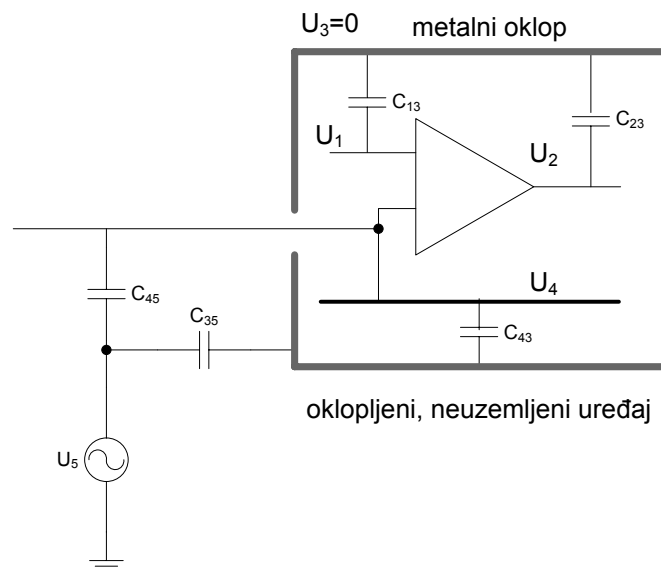
- uređaj nije dovoljno oklopiti (metalnim kućištem), već ga je poželjno i **uzemljiti!**
- **spojiti zajedničku točku sklopa s metalnim kućištem:**



- eliminiraju se parazitne kapacitivne povratne veze
- kapaciteti vodova prema metalnom kućištu predstavljaju parcijalne kapacitete prema definiranoj masi sklopa

Uzemljenje i oklapanje

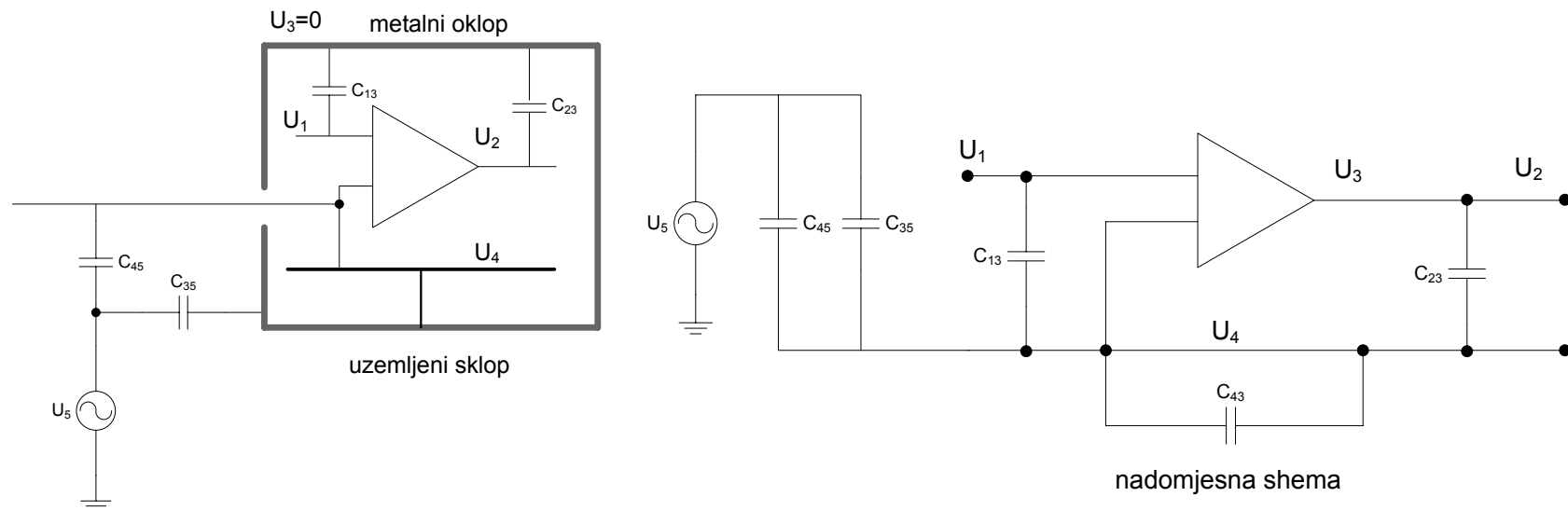
- primjer: neuzemljeni oklopljeni uređaj u vanjskom električnom polju
 - iz uređaja izvučen neoklopljeni kabel (npr. zajednička točka sklopa)



- smetnje vanjskog električnog polja spregnute u sklop zato što sklop nije uzemljen na kućište! – **neefikasno oklapanje – oklop beskoristan!**

Uzemljenje i oklapanje

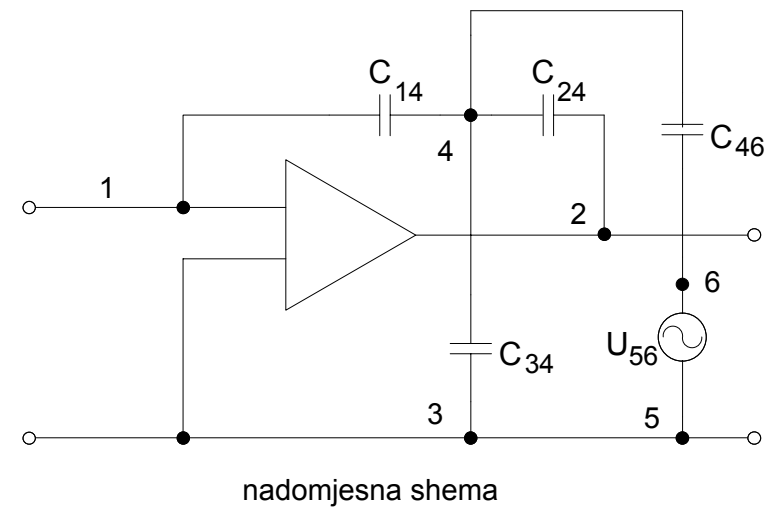
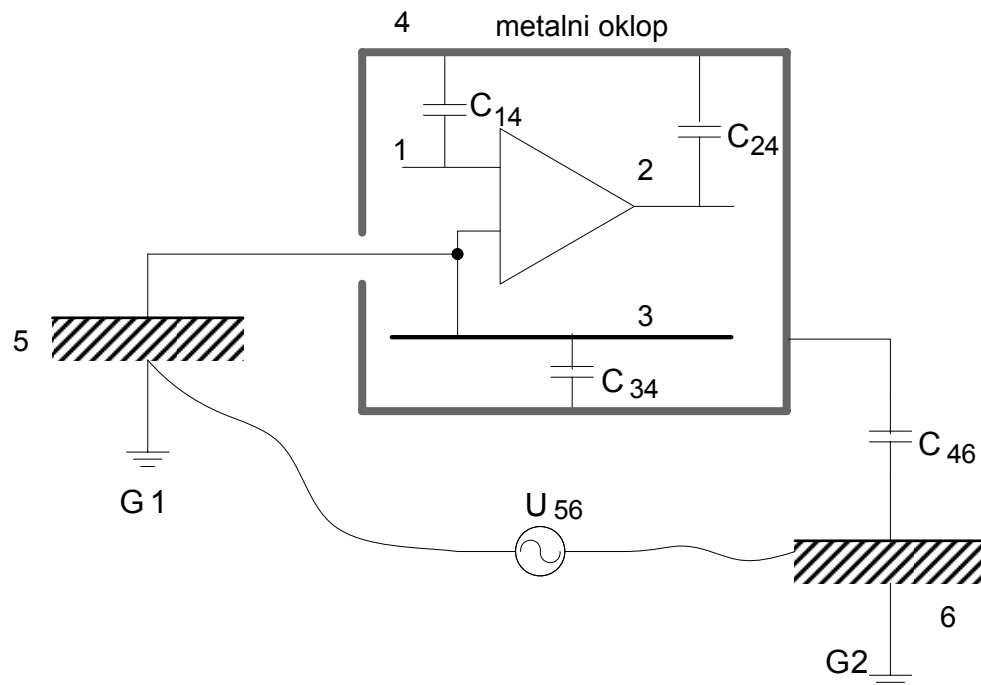
- primjer: uzemljeni oklopljeni uređaj u vanjskom električnom polju
 - iz uređaja izvučen neoklopljeni kabel kao i u prethodnom primjeru (zajednička točka)



- **efikasno oklapanje** – eliminiran utjecaj vanjskih smetnji električnog polja i kapacitivne parazitske povratne veze preko kućišta

Uzemljenje i oklapanje

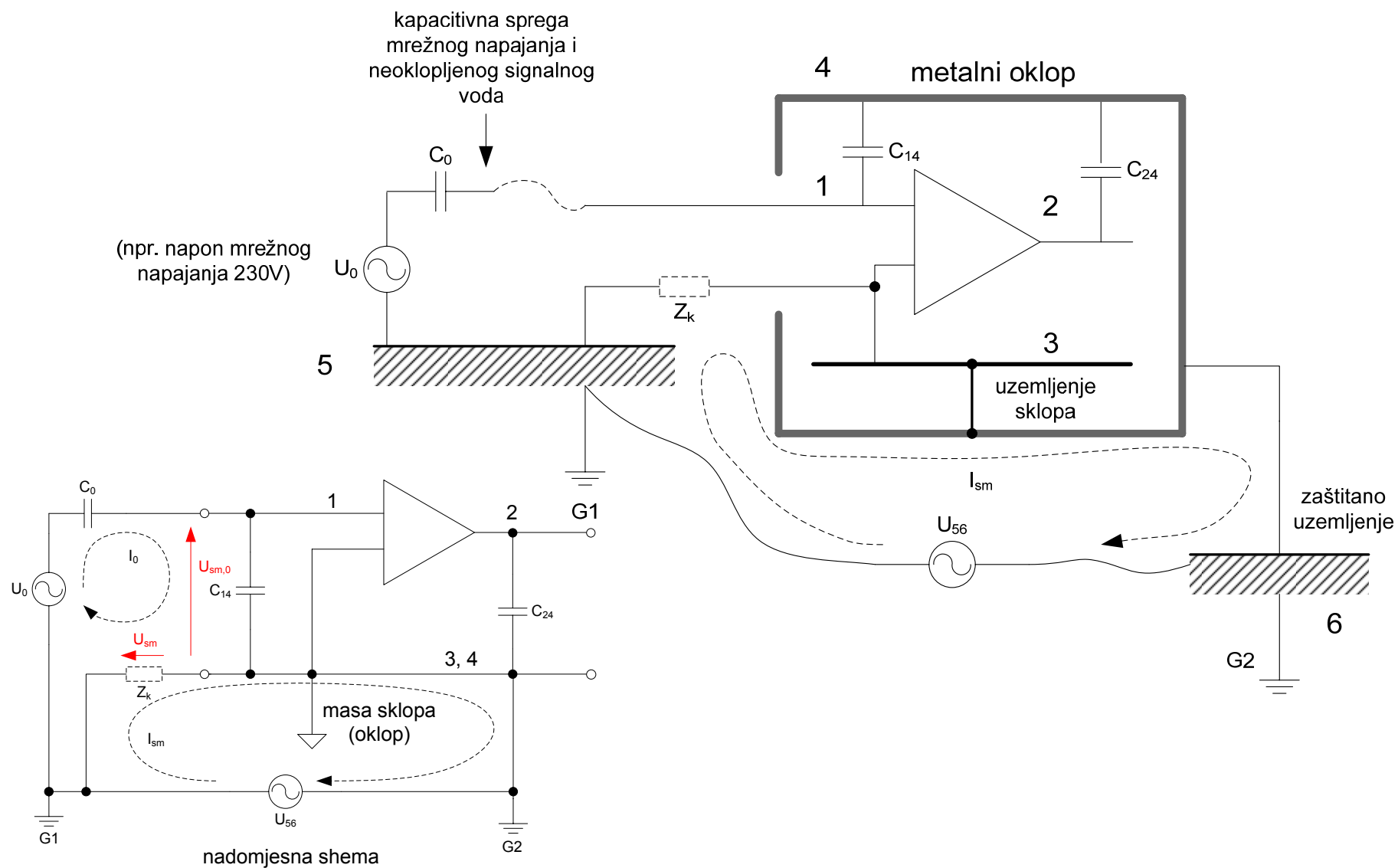
- vanjsko “uzemljenje” zajedničkog potencijala (npr. asimetrični spoj mjernog signala)
- C_{46} – kapacitet kućišta prema lokalnom **potencijalu uzemljenja** (plivajući uređaj)



Uzemljenje i oklapanje

- vrijedi pravilo: ako se **neoklopljeni signalni vod** izvodi izvan oklopljenog uređaja, zbog sprege s vanjskim električnim poljem smetnje će biti unesene u uređaj!
- to je posebno kritično kod osjetljivih analognih signala (npr. biomedicinski signali, mosna mjerenja, mjerni pretvornici i sl. – korisni signal može biti i reda veličine $\sim \mu\text{V}$)
- samo oklapanje uređaja nije dovoljno – potrebno je i **oklapanje osjetljivih signalnih vodova**, odnosno proširenje Faradeyevog kaveza i izvan granica kućišta uređaja!

Uzemljenje i oklapanje



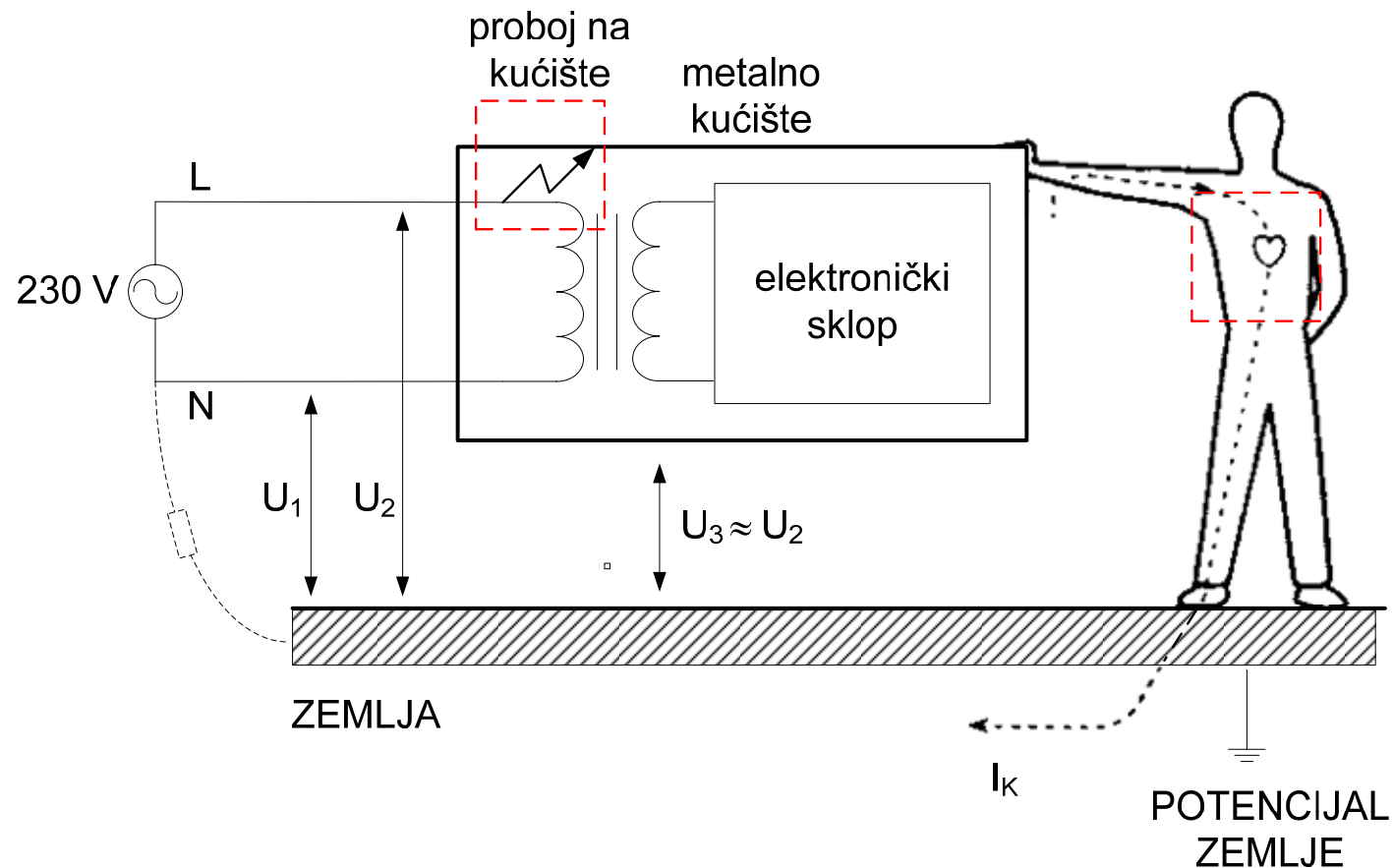
Računalom podržano projektiranje elektroničkih uređaja

Uzemljenje

- pojmovi:
 - **potencijal mase** (*ground potential*) – referentna točka elektroničkog sklopa (može i ne mora biti spojena na kućište uređaja),
 - **zaštitno uzemljenje** (*protective earth, PE*) – spoj kućišta i svih metalnih dijelova uređaja koji mogu doći u dodir s opasnim naponom na zaštitni vod uzemljenja, povezanim sa “zemljom”,
 - “**masa**” ili “**zemlja**” - “*large conducting body that can supply charge without changing relative potential*”,
 - **uzemljivač** – sustav vodiča ukopanih u zemlju radi postizanja niskog **otpora (zaštitnog) uzemljenja**

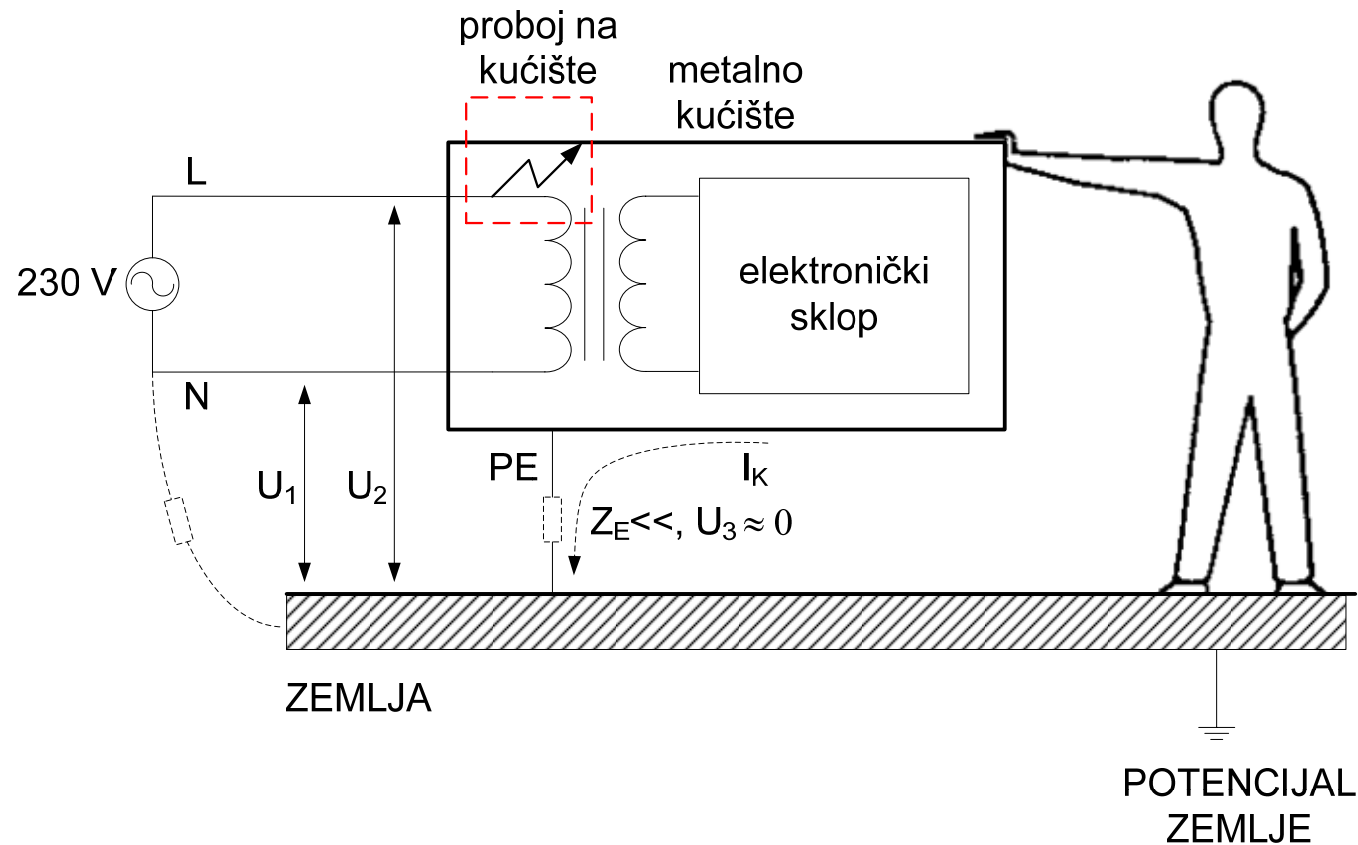
Zaštitno uzemljenje

- neuzemljeni uređaj (kućište **nije povezano** sa zaštitnim uzemljenjem)



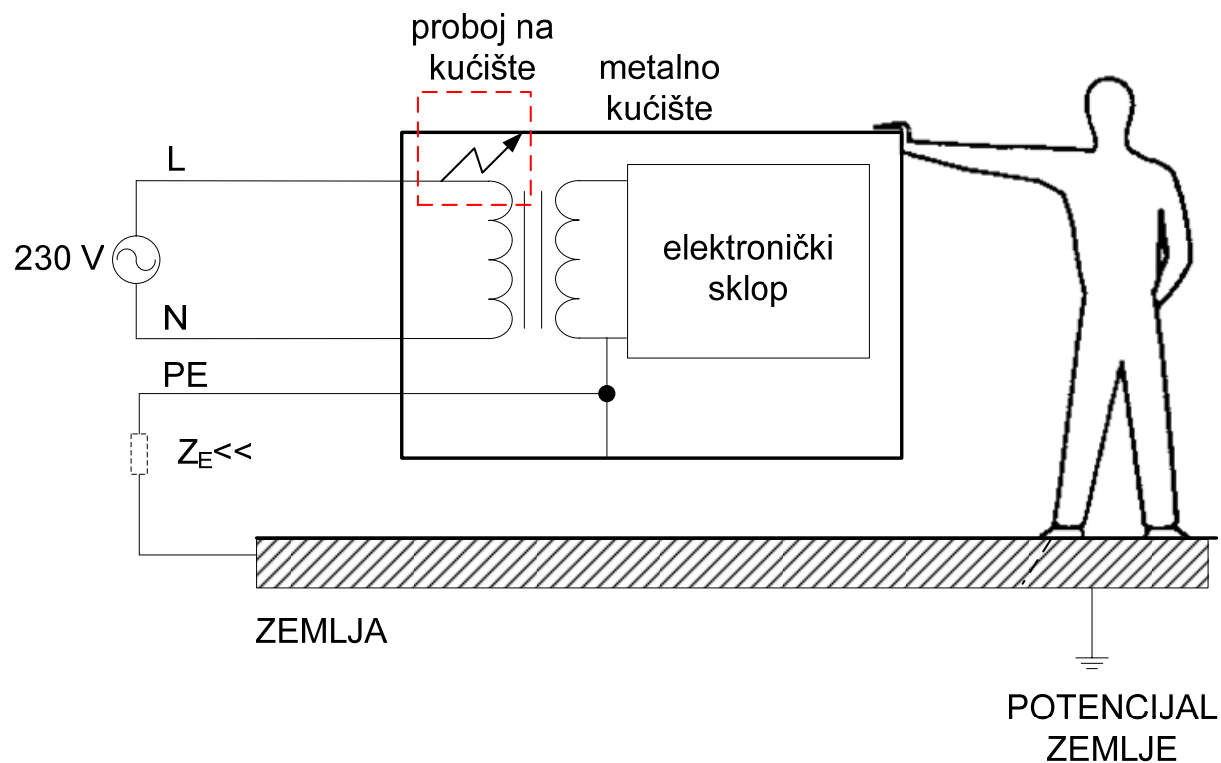
Zaštitno uzemljenje

- uzemljeni uređaj (kućište **povezano** sa zaštitnim uzemljenjem)
- masa signala na sekundaru (referentni potencijal) – ne mora se nužno spajati na zaštitno uzemljenje (npr. plivajuće pojačalo)



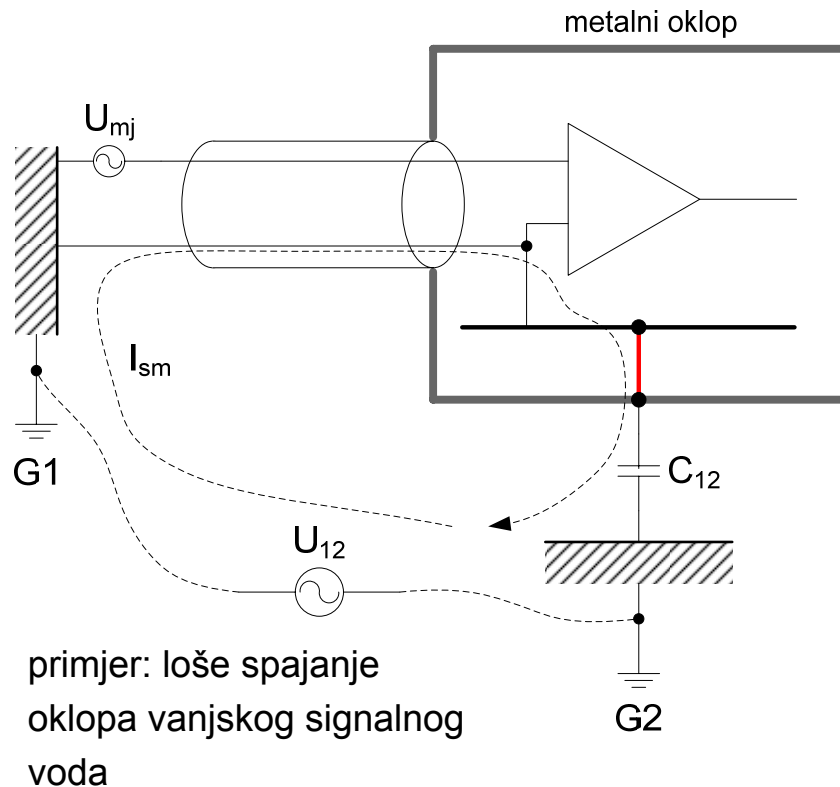
Zaštitno uzemljenje

- PE (*protective earth*) – žuto-zelena žica (spoj na uzemljivač):
 - mora biti na potencijalu okoline,
- spoj mase signala sekundara na kućište



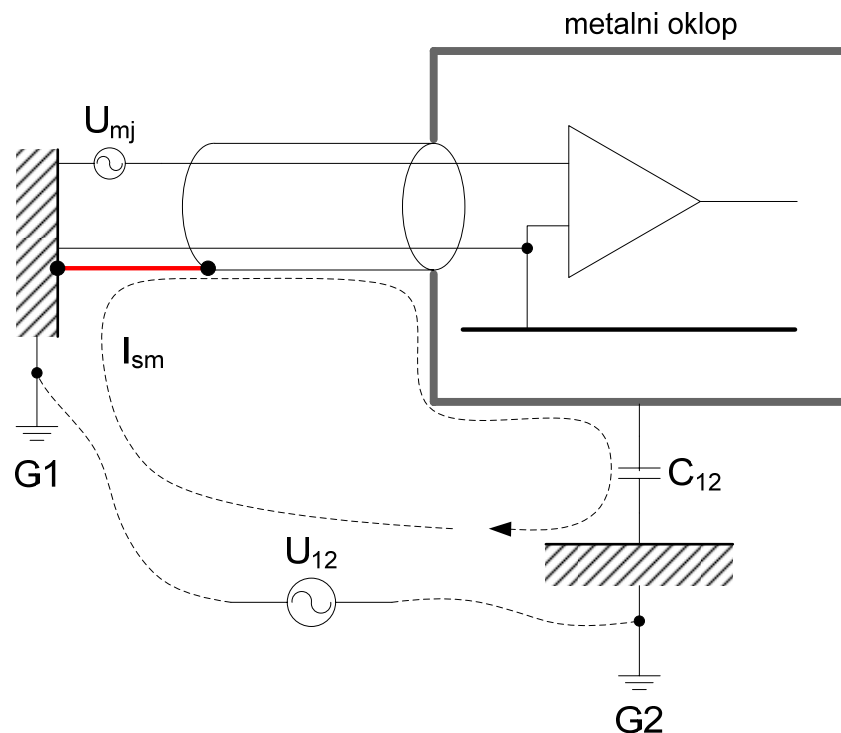
Uzemljenje oklopa

- ako je mjerni signal uzemljen, i oklop mora biti negdje uzemljen
- pitanje: gdje uzemljiti oklop?
- primjer - asimetrični signal:



- između potencijala zemlje G1 i G2 u općem slučaju postoji **razlika potencijala** U_{12} , koja uzrokuje struju smetnje I_{sm}
- ako se u ovom slučaju oklop uzemlji na kućište uređaja, struja smetnje će se zatvoriti kroz signalni vod!
- ista situacija bit će i ako uređaj nije plivajući, tj. ako je umjesto preko rasipnog kapaciteta C_{12} izravno uzemljen na G2

Uzemljenje oklopa

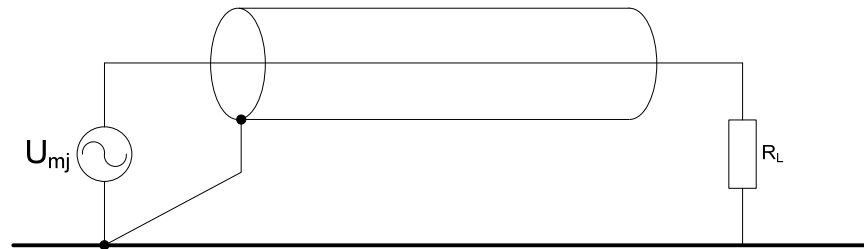


primjer: dobro spajanje
oklopa vanjskog signalnog
voda

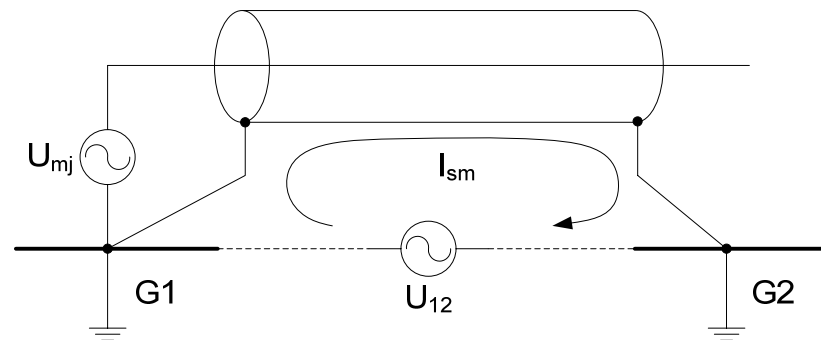
- ako je oklop uzemljen na mjestu gdje i izvor asimetričnog mjernog signala, kapacitivna struja smetnje zatvarat će se kroz oklop, umjesto kroz signalni vod

Uzemljenje oklopa

- oklop je preporučljivo uzemljiti na strani mjernog signala:



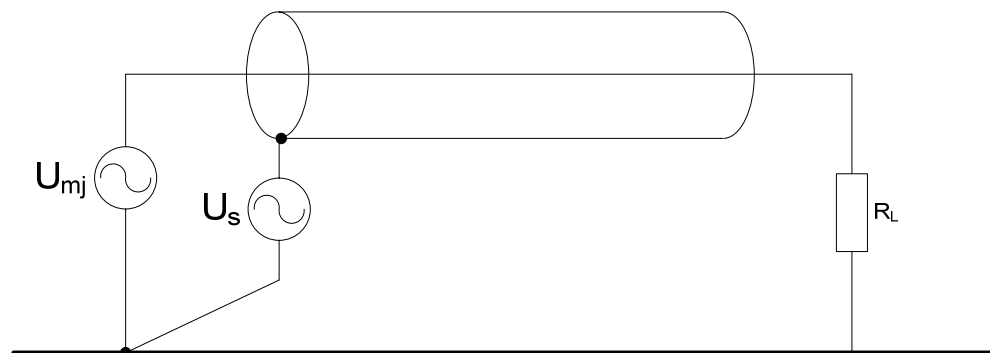
- oklop treba uzemljiti **samo na jednom mjestu** (tj. kroz oklop **ne bi smjela** teći struja):



- struja I_{sm} koja teče zbog razlike potencijala između G1 i G2 bit će **induktivno** spregnuta s mjernim signalom!

Uzemljenje oklopa

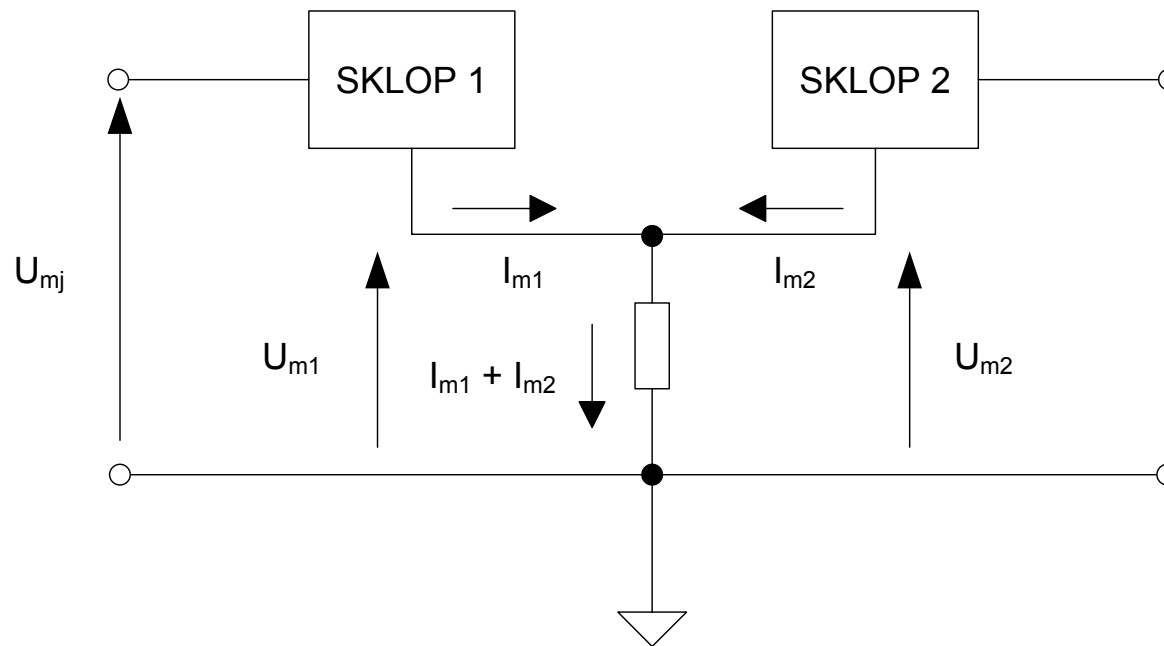
- između potencijala uzemljenja i oklopa ne bi smjela postojati razlika potencijala:



- razlika potencijala U_s bit će **kapacitivno** spregnuta mjernom vodu

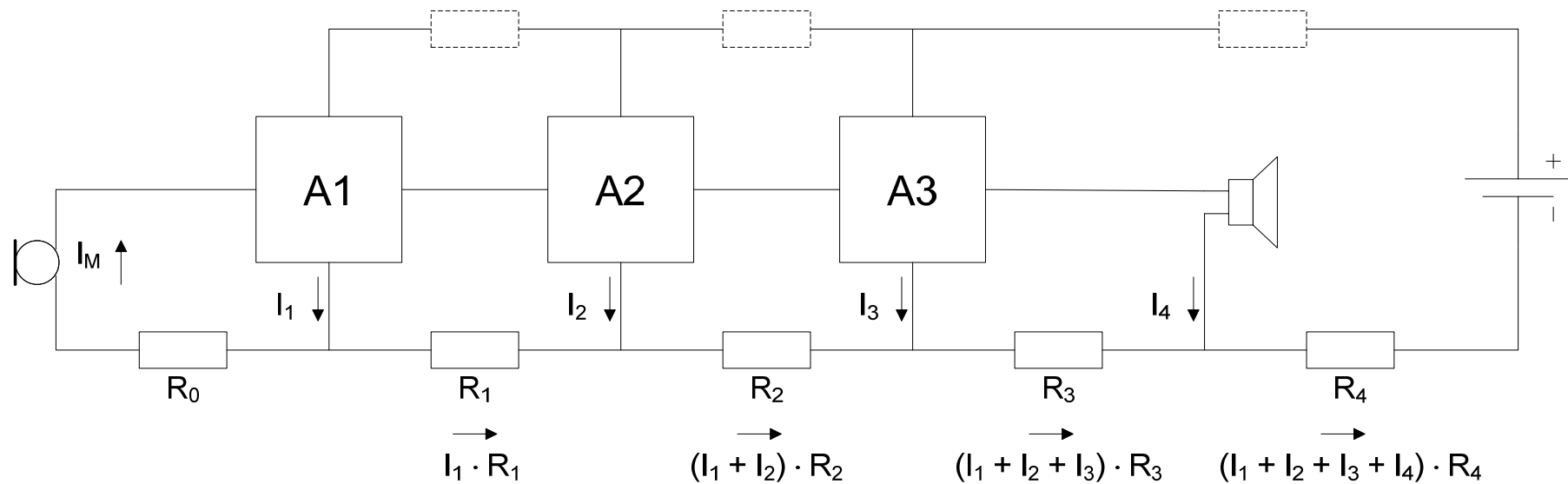
Zajednička impedancija vodova mase

- pri spajanju na masu potrebno je spriječiti pojavu napona smetnje koji se može pojaviti zbog protjecanja struje dvaju ili više sklopova u zajedničku impedanciju mase
- primjer: smetnje zajedničke impedancije **mase** kod mjerenja napona U_{mj} :



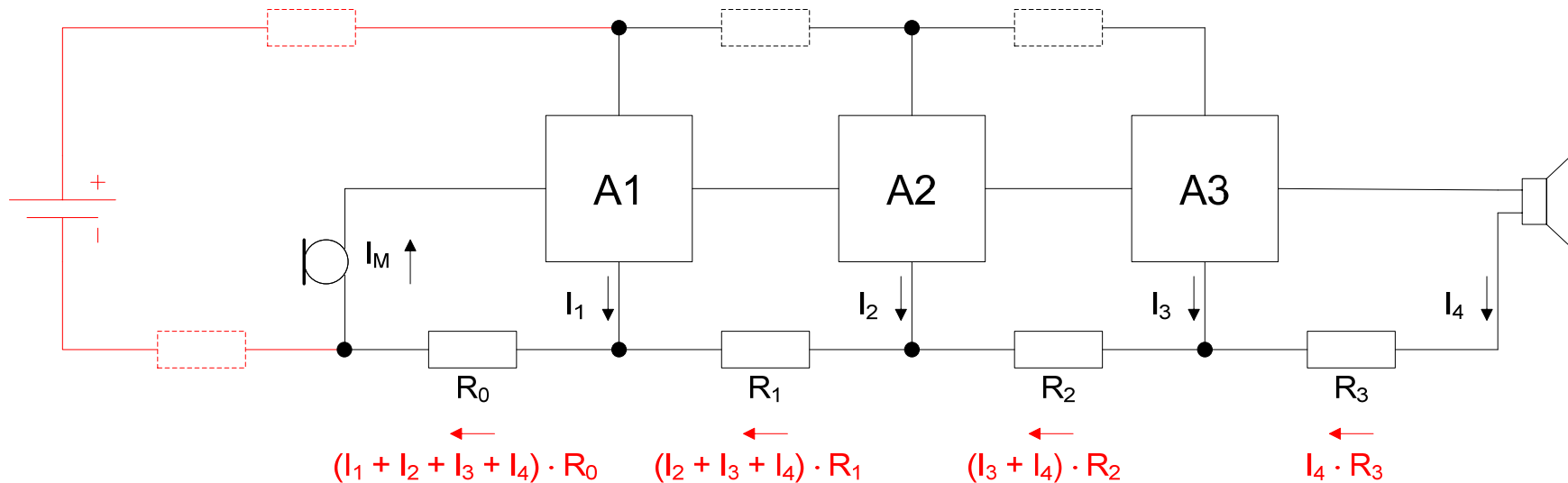
Serijsko spajanje na masu (*daisy chain*)

- primjer: audio pojačalo (ispravno razvođenje napajanja i mase):



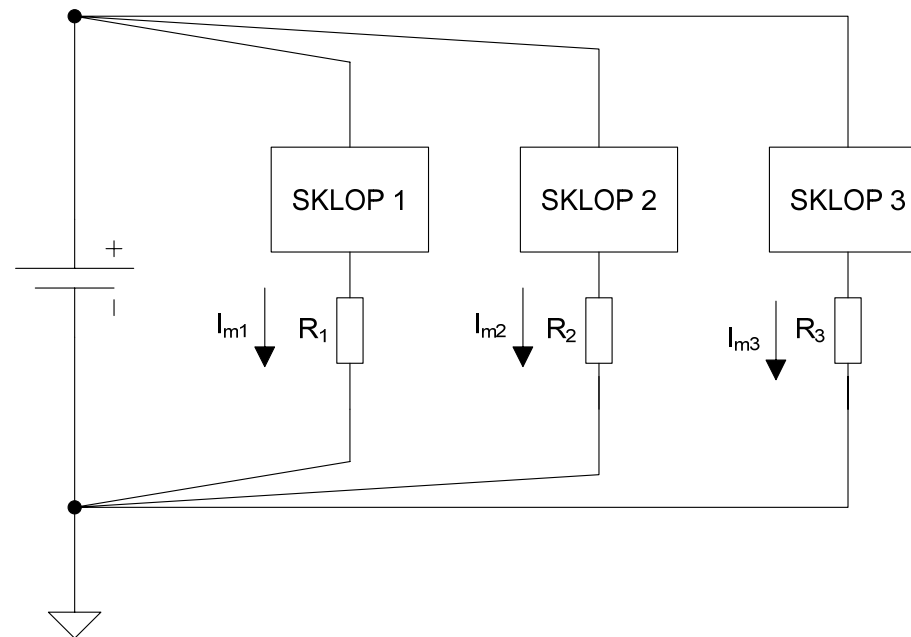
Serijsko spajanje na masu

- primjer: audio pojačalo (**neispravno** razvođenje napajanja i mase)



- pravilo: mase se vodi od stupnja s najmanjom potrošnjom prema stupnjevima s većom potrošnjom, a na kraju se spaja izvor napajanja
- serijski spoj je najjednostavniji, ali i **najlošiji** način spajanja mase!

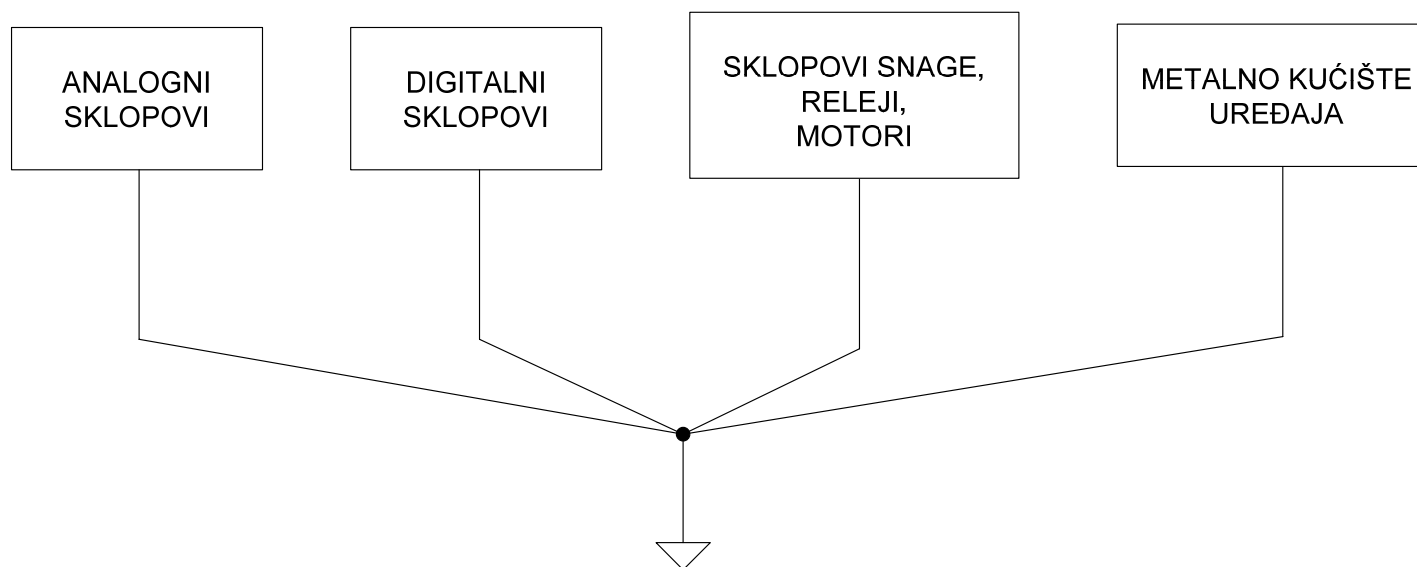
Paralelno spajanje na masu (*star ground*)



- potencijal svakog sklopa određen vlastitom strujom i otporom vodiča
- **bolje** od serijskog načina spajanja, ali **nepraktično** za veće sklopove
- za frekvencije > 10 MHz impedancija vodova postaje prevelika, pa se ovako spajanje na masu preporučuje za sklopove do 1 MHz

Kombinirano spajanje na masu (serijsko-paralelno)

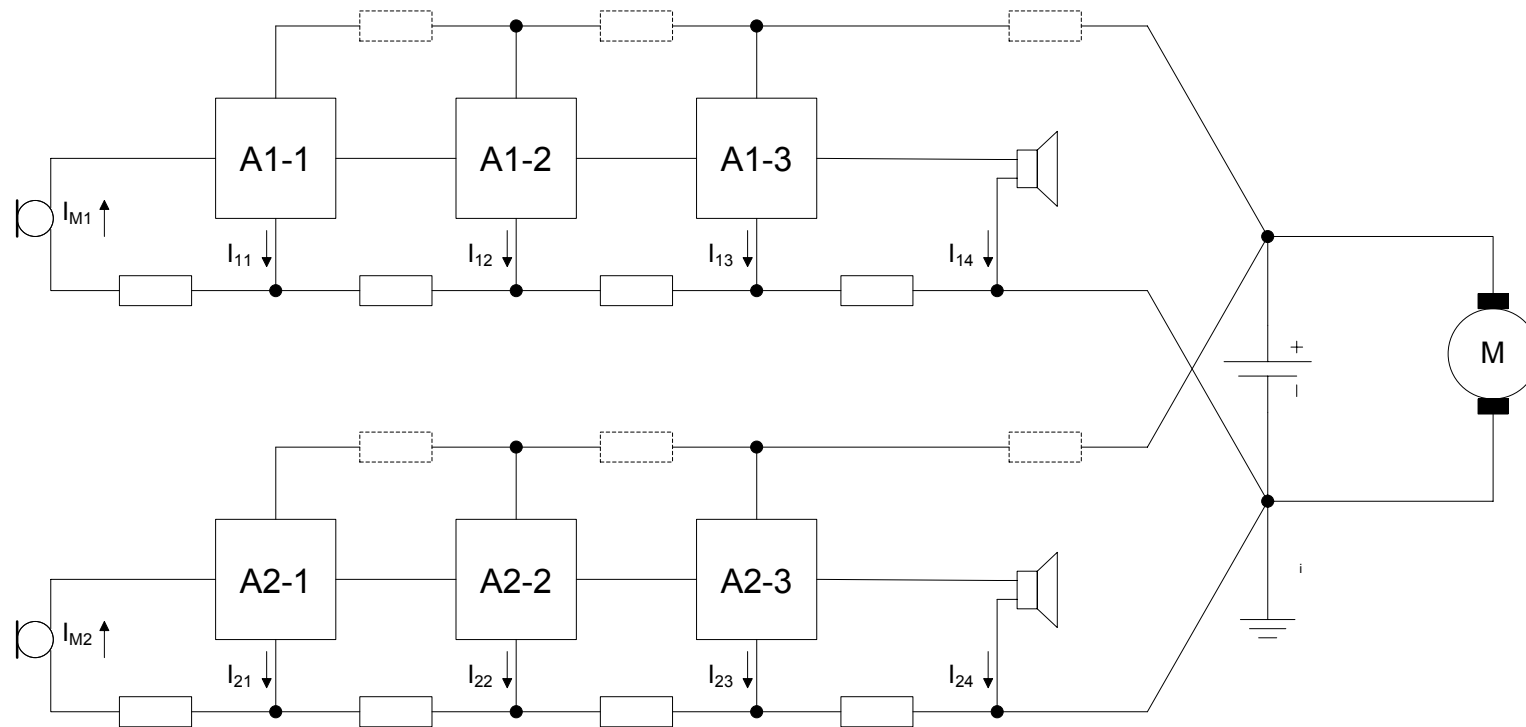
- sklopove potrebno svrstati u grupe koje imaju isti vodič mase, prema funkcijama:



- kompromis između zahtjeva za smanjenjem smetnji uslijed zajedničke impedancije i zahtjeva za jednostavnom izvedbom
- zaštitno uzemljenje je najbolje spojiti u tu zajedničku točku

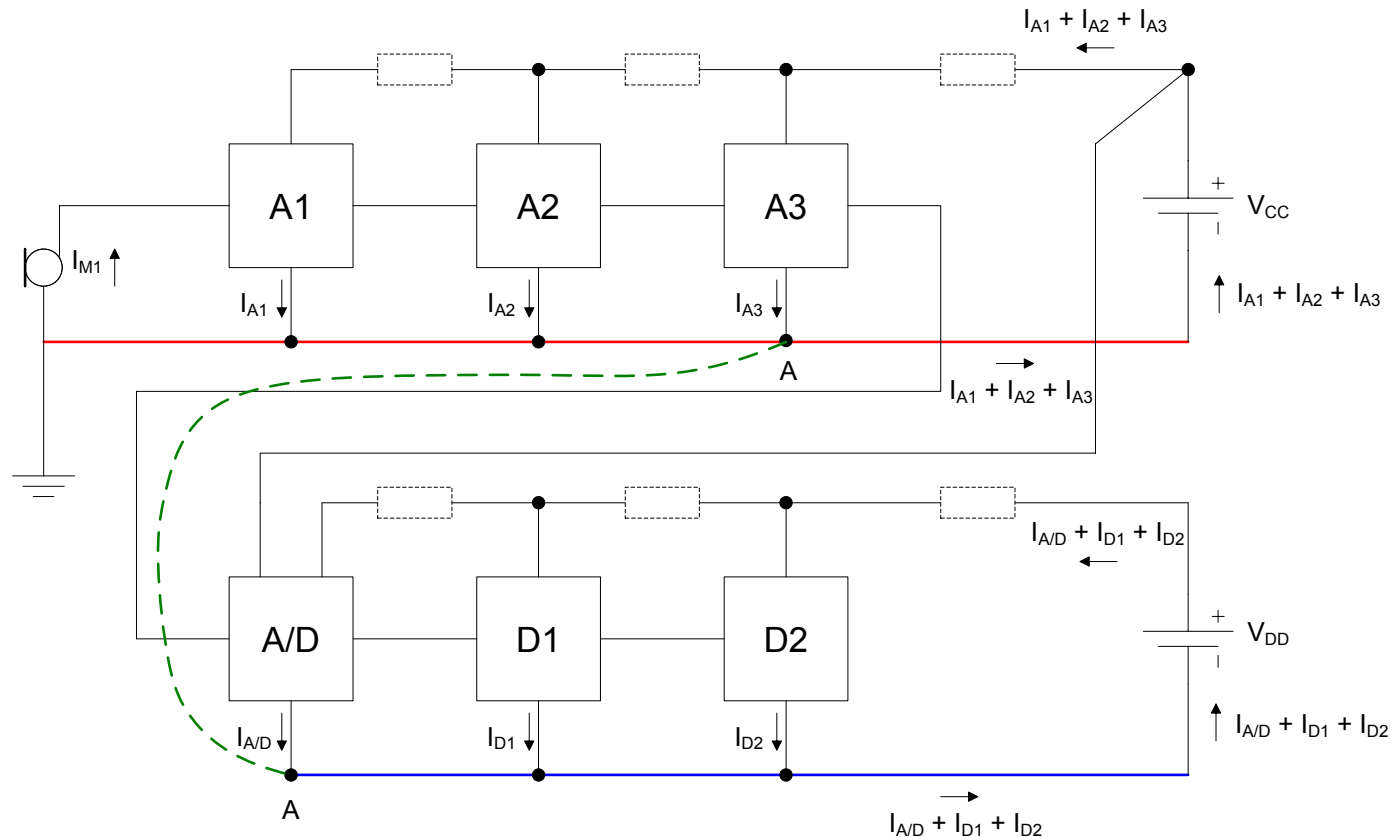
Kombinirano spajanje na masu (serijsko-paralelno)

- primjer: stereo pojačalo i motor magnetofona (ispravno razvođenje napajanja i mase)
- razdvojen lijevi i desni audio kanal, motor odvojen od analognog dijela



Kombinirano spajanje na masu (serijsko-paralelno)

- primjer: sklop s analognim i digitalnim dijelovima

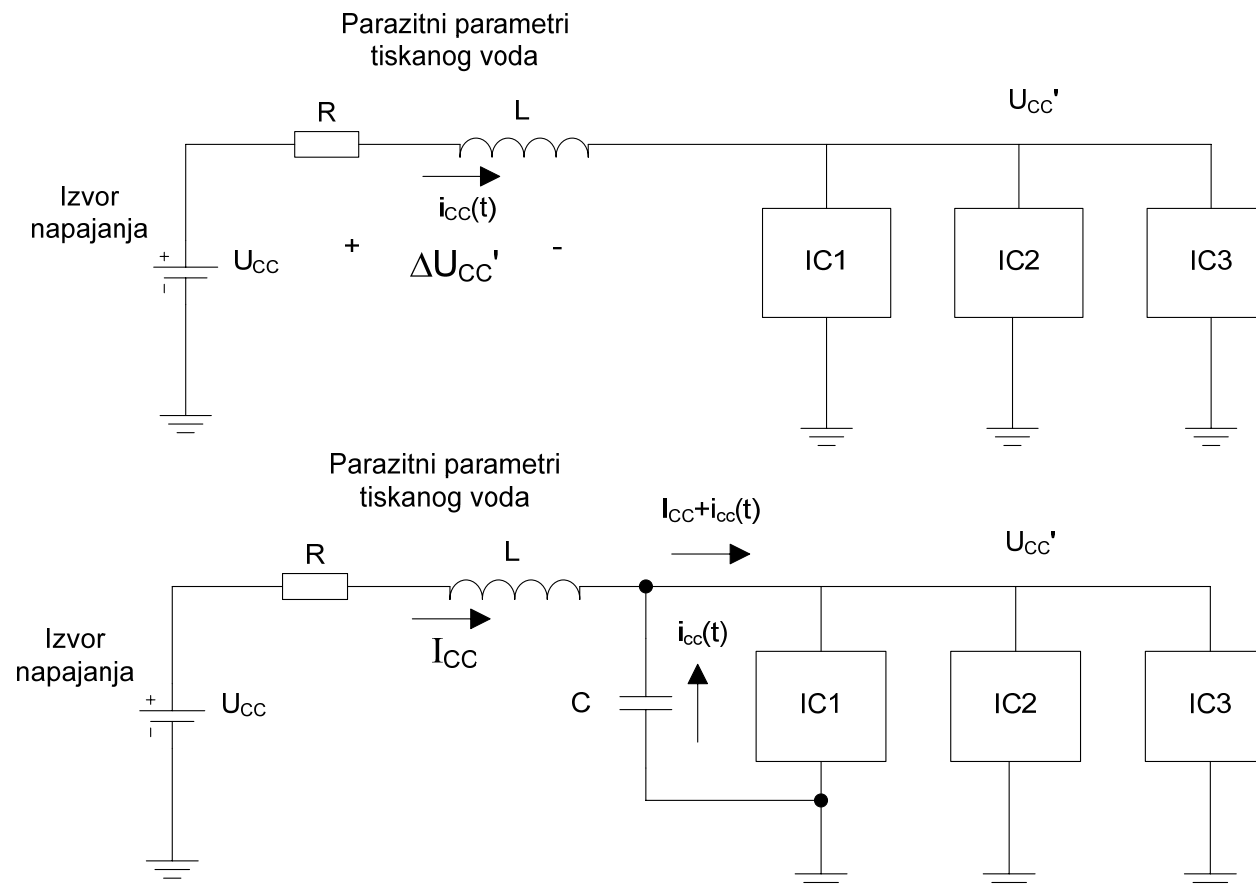


Kombinirano spajanje na masu (serijsko-paralelno)

- sklop ima dva napajanja (V_{CC} za analogni dio i V_{DD} za digitalni dio)
- uzemljiti na ulazu (najosjetljiviji dio sklopa na potencijalu okoline)
- analogna i digitalna masa razvode se **zasebno** (serijski)
- analogna i digitalna masa spajaju se na zajedničkoj točki A/D pretvornika

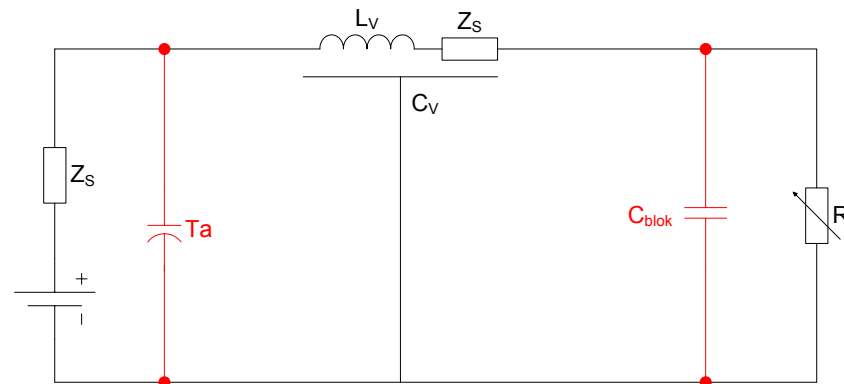
Zajednička impedancija vodova napajanja

- problem brzih promjena logičkih stanja u digitalnim sklopovima (blokadni kondenzatori):



Zajednička impedancija vodova napajanja

- razmatranje impedancije vodova napajanja kao linija s raspodjeljenim parametrima:



- karakteristična impedancija vodova napajanja (uz aproksimaciju linije bez gubitaka):

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L_v}{C_v}}$$

- karakteristična impedancija **ne ovisi** o duljini voda! (tipični iznos oko 80 Ω)

Zajednička impedancija vodova napajanja

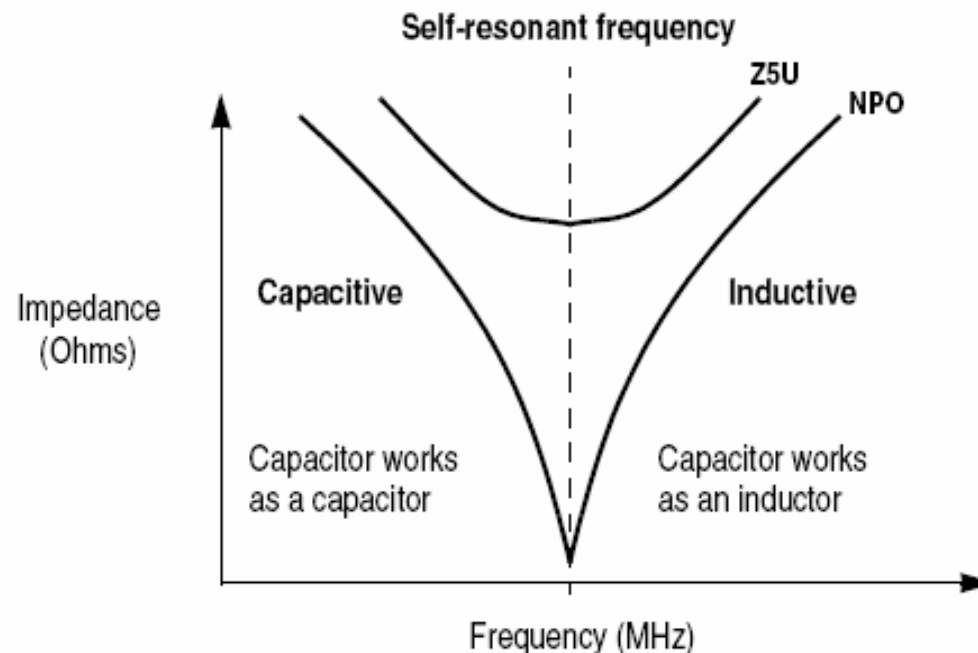
- primjer: pad napona uslijed nagle promjene struje za $Z_0 = 80 \, \Omega$, $\Delta I = 12,5 \, \text{mA}$:

$$\Delta U_L = \Delta I \cdot Z_0 = 1 \, \text{V!}$$

- paralelno dodavanje kondenzatora integriranim sklopovima (keramički kondenzatori 10-100 nF) smanjuje karakterističnu impedanciju vodova napajanja
- paralelno dodavanje tantalovih elektrolitskih kondenzatora izvoru povoljno je jer smanjuje porast impedanciju izvora za visoke frekvencije, tj. brze promjene

Blokadni kondenzatori

- kod sklopova koji rade na višim frekvencijama potrebno je voditi računa o vrijednosti blokadnog kondenzatora (određuje rezonantnu frekvenciju zbog postojanja parazitnog induktiviteta)
- npr. kondenzatori od 100nF efikasni su za taktove do 33 MHz, dok je 10 nF efikasniji za signal vremenskog vođenja 100 MHz



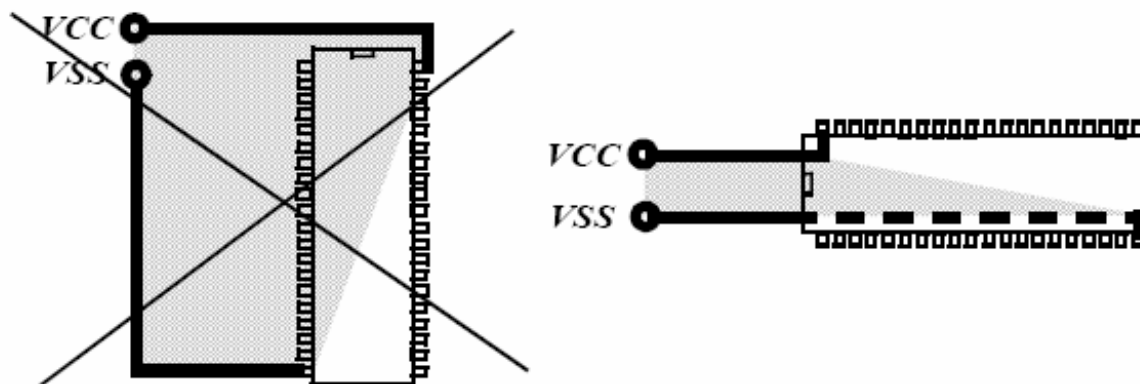
Blokadni kondenzatori

- rezonantne frekvencije keramičkih kondenzatora različitih iznosa u različitim kućištima (X7R):

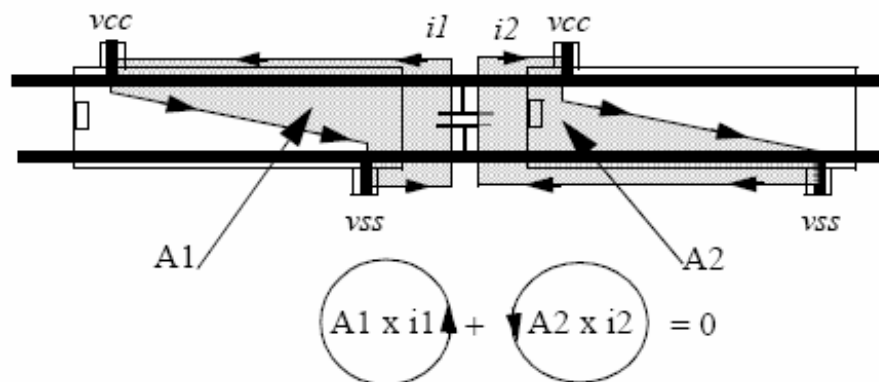
Capacitor Value	Through-hole (0.25 leads)	Surface mount (0805)
1.0 μF	2.5 MHz	5 MHz
0.1 μF	8 MHz	16 MHz
0.01 μF	25 MHz	50 MHz
1000 pF	80 MHz	160 MHz
100 pF	250 MHz	500 MHz
10 pF	800 MHz	1.6 GHz

Blokadni kondenzatori

The Surface of the VCC and VSS Network has to be Reduced

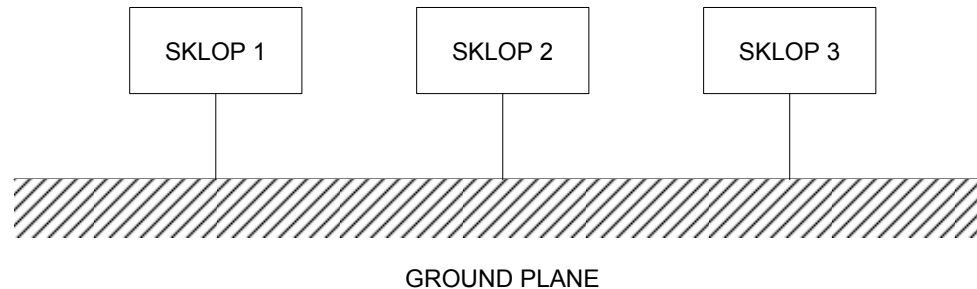


H Field Cancellation

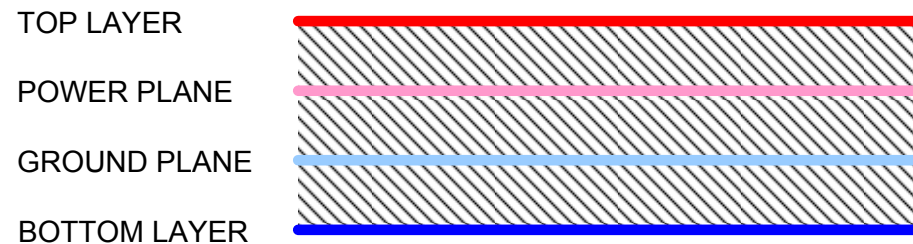


Spajanje signalne mase i napajanja u više točaka

- nužno kod brzih impulsnih sklopova (> 10 MHz)
- svaki sklop priključiti što bliže masi, čim kraćim vodičem

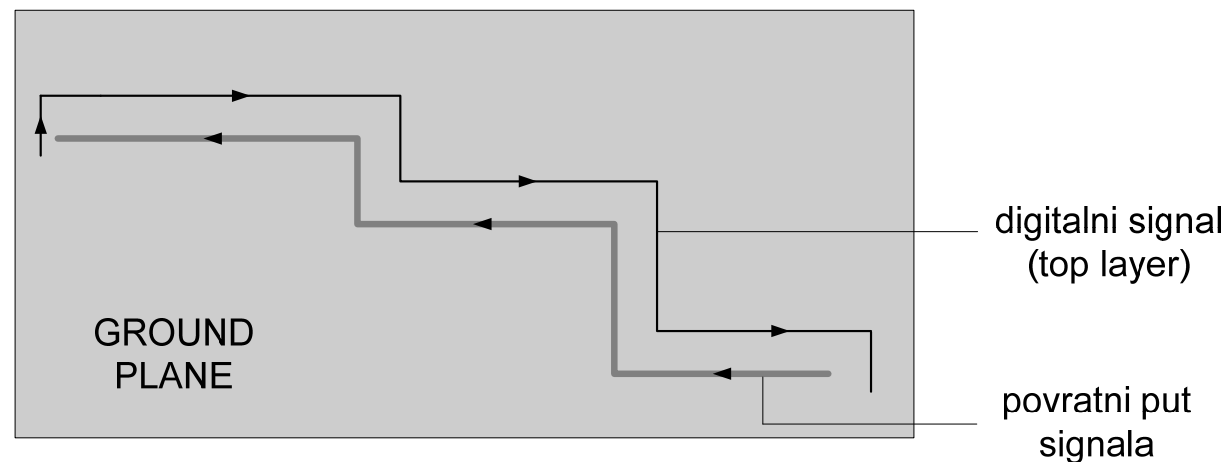


- *ground plane* – cijela površina (sloj) tiskane pločice koristi se kao masa
- npr. *layer stack-up* kod 4-slojne tiskane pločice:



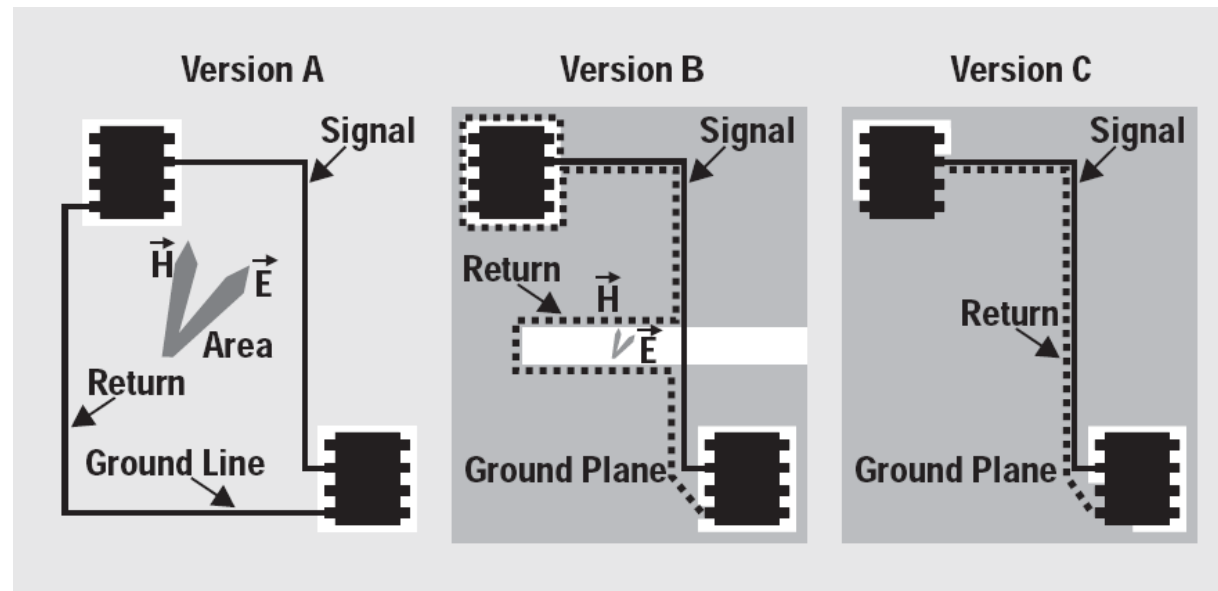
Ground plane

- digitalne sklopove potrebno je (s gledišta generiranja EM smetnji) tretirati kao brze analogne (RF) sklopove (zbog viših harmonika pravokutnog valnog oblika)
- *image plane* – ispunjeni vodljivi sloj koji predstavlja povratni put za RF struju (idealno – neprekinuti *ground plane*)
- povratni put RF struje je *zrcalna slika signala* (kapacitivno-induktivna sprega s najbližom vodljivom masom)



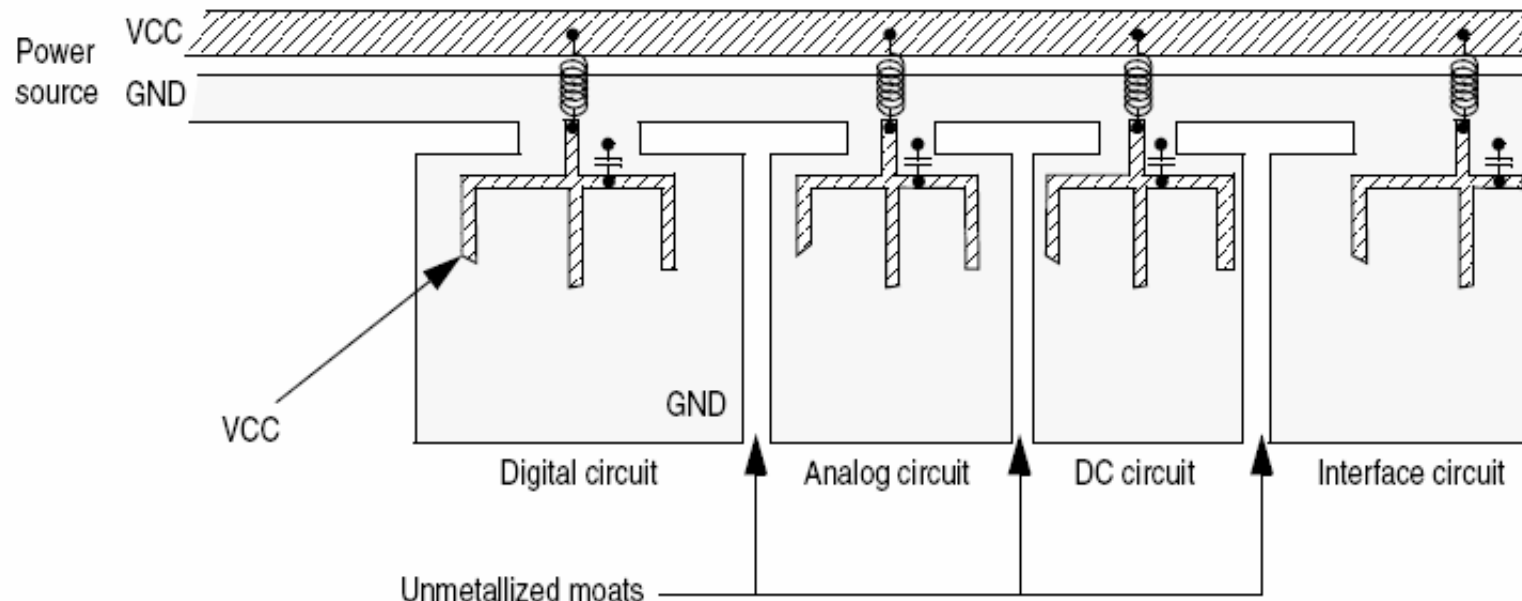
Ground plane

- homogeni *image plane* \Rightarrow min. površina povratne strujne petlje \Rightarrow min. emisija smetnji (idealno poništavanje EM polja)
- ako *image plane* nije kontinuiran (npr. signalni vodovi u *planeu*), nastaje “zaobilazna” povratna petlje veće površine \Rightarrow veća emisija RF smetnji



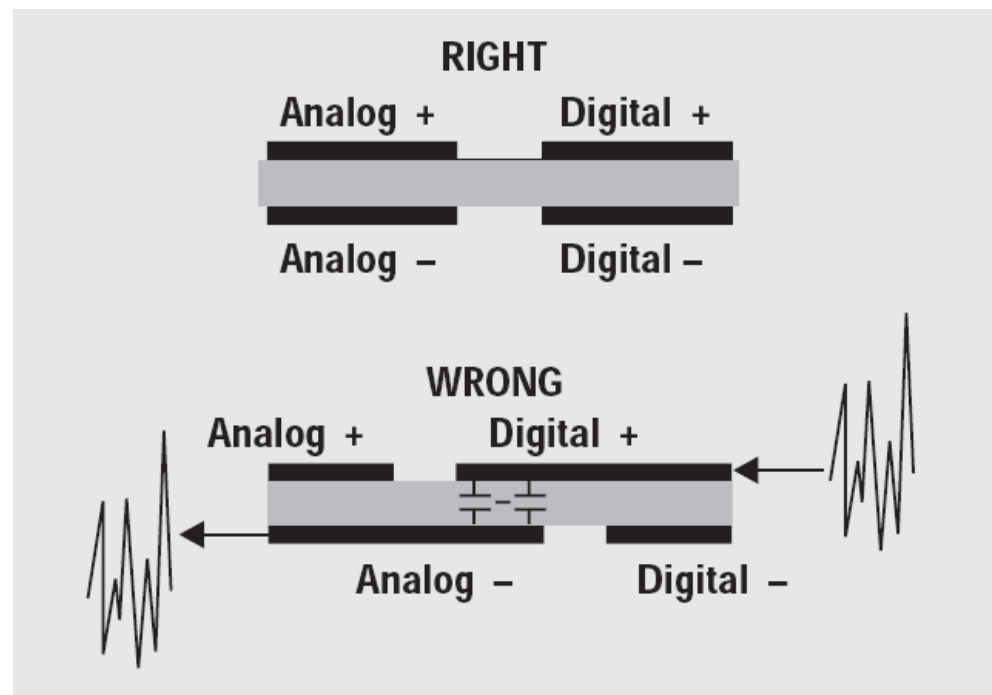
Ground plane

- analogni i digitalni *ground plane* preporučljivo je fizički **razdvojiti** i spojiti u **samo jednoj točki** (radi sprečavanja smetnji zajedničke impedancije mase između digitalnog i analognog dijela)
- između *ground planeova* ostaviti izjetkana područja (*moats*)



Ground plane

- preporučljivo je da se analogni i digitalni *ground* i *power plane* **ne preklapaju** (kada se razvode na različitim slojevima) :



- u suprotnom, smetnje digitalnog napajanja mogu se kapacitivno spregnuti na analogni *ground plane*

Ground plane

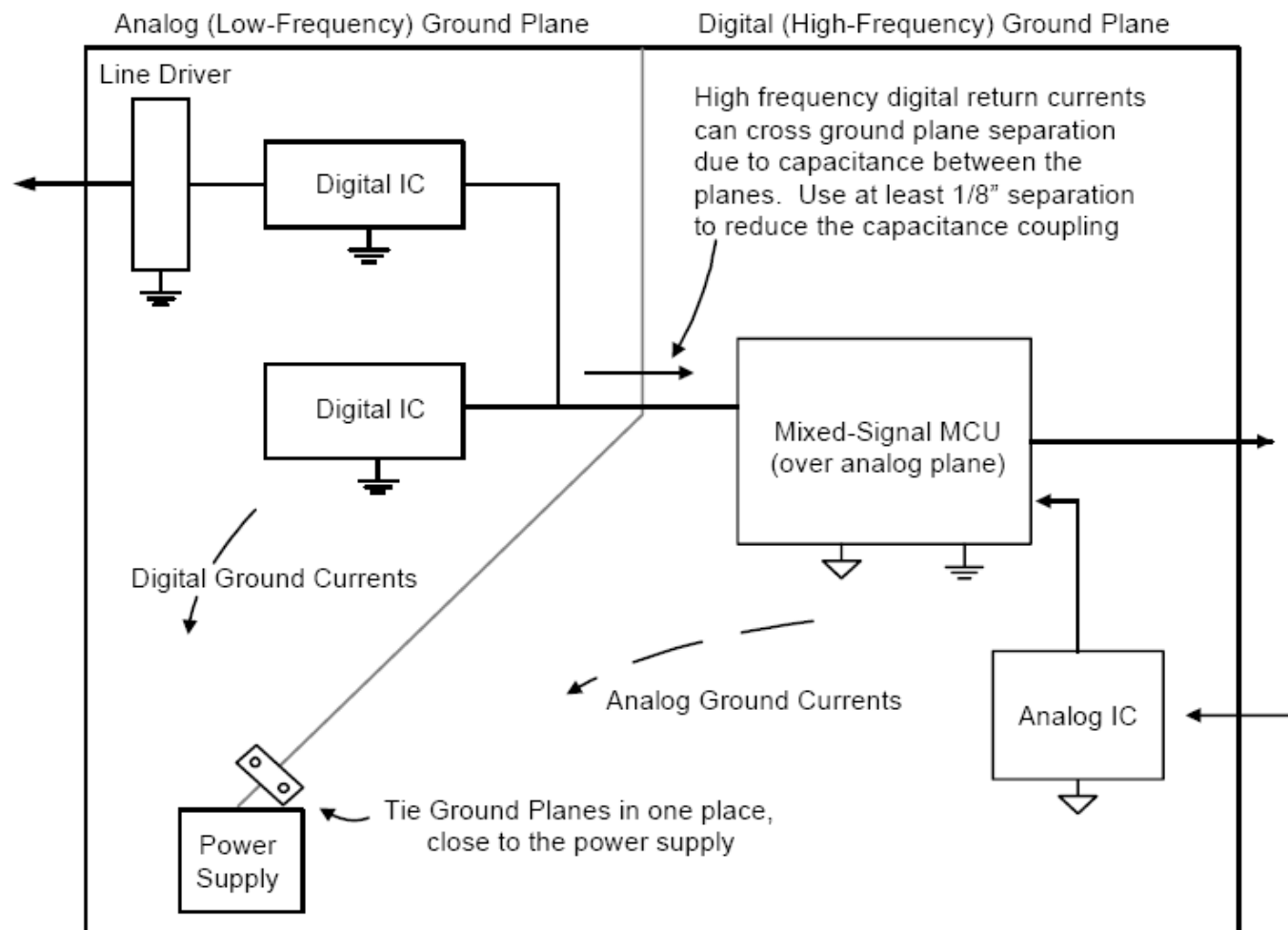


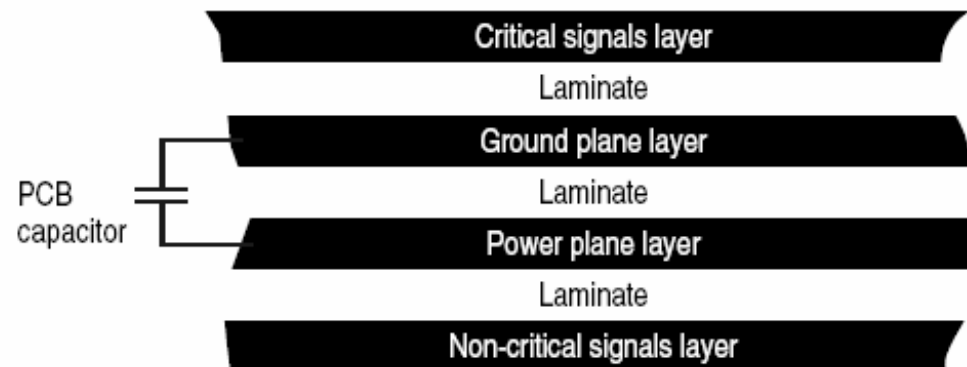
Figure 6. Using Split Analog and Digital Ground Planes

Ground plane

- analogni i digitalni *ground plane* trebali bi biti razdvojeni barem 3 mm (125 mils) (radi smanjenja međusobne kapacitivne sprege)
- kod dvoslojnih tiskanih pločica, dobro je napraviti ispunjavanje neiskorištenog prostora između signalnih vodova s obje strane tiskane pločice i spajanje na masu (*ground plane* poligon) (na dvoslojnim pločicama se ne izvodi “*power plane*”)
- na takav način dobiva se distribuirana masa niske karakteristične impedancije, a vodljiva ispuna između signalnih vodova spojena na masu djeluje kao efikasni oklop za smetnje uslijed električnog polja
- važno je paziti da ne ostanu plivajući “otoci” ispune koji nisu povezani s masom (ono mogu predstavljati izvor VF smetnji – pasivne antene)

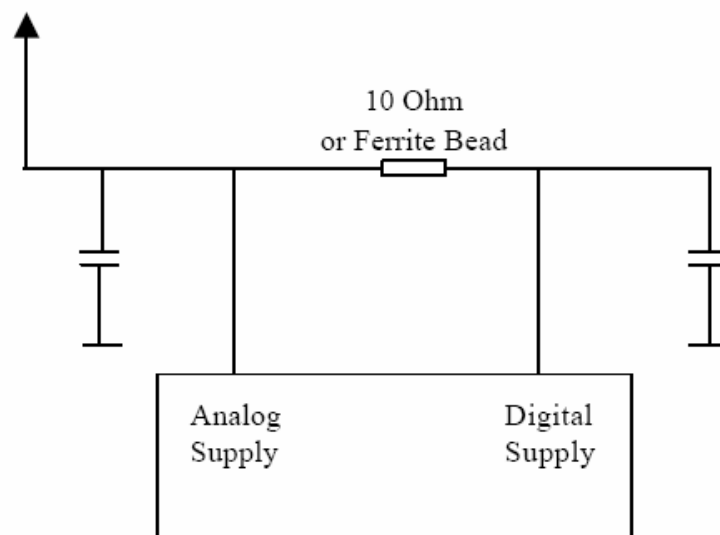
Power plane

- slična pravila dizajna kao i za *ground plane*
- obavezno postaviti analogni i digitalni *power plane* iznad odgovarajućeg *ground planea* (zbog mogućnosti kapacitivne sprege smetnji iz digitalnog napajanja u analognu masu)
- *power plane* je lošiji kao RF *image plane* u odnosu na *ground plane*!



Razdvajanje analognog i digitalnog napajanja

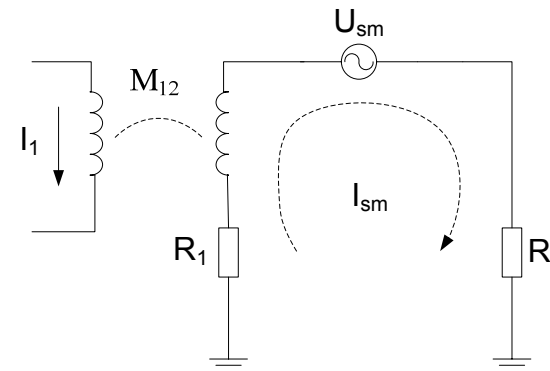
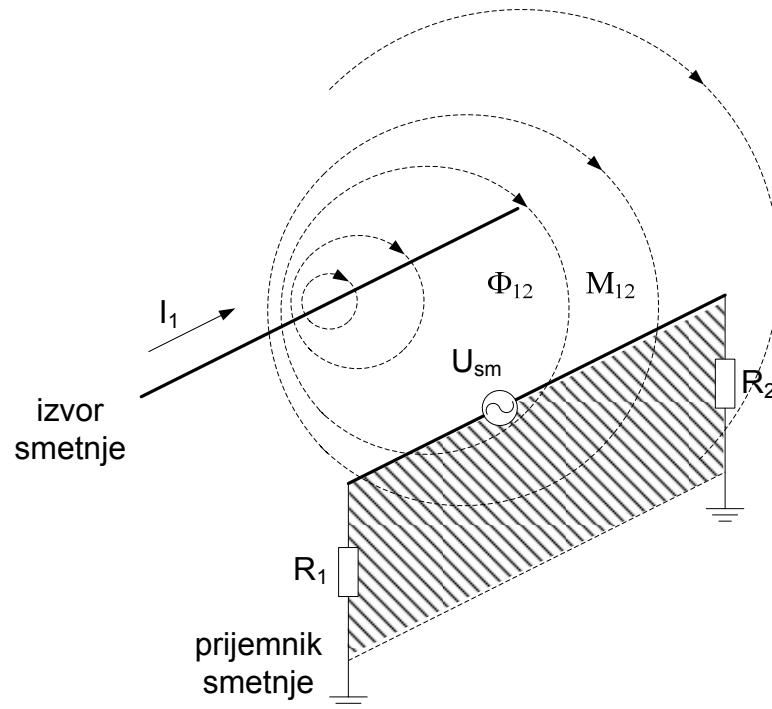
- za komponente za mješovitu obradbu signala (npr. *mixed-signal* mikrokontrolere) preporučljivo je razdvojiti analognu i digitalnu napajanje (kada se koristi jedan stabilizator):



- za razdvajanje napajanja mogu se koristiti feritne perle ili žičani otpornici malenog otpora (koristi se njihov parazitni induktivitet)

Smetnje uslijed magnetskog polja (NF)

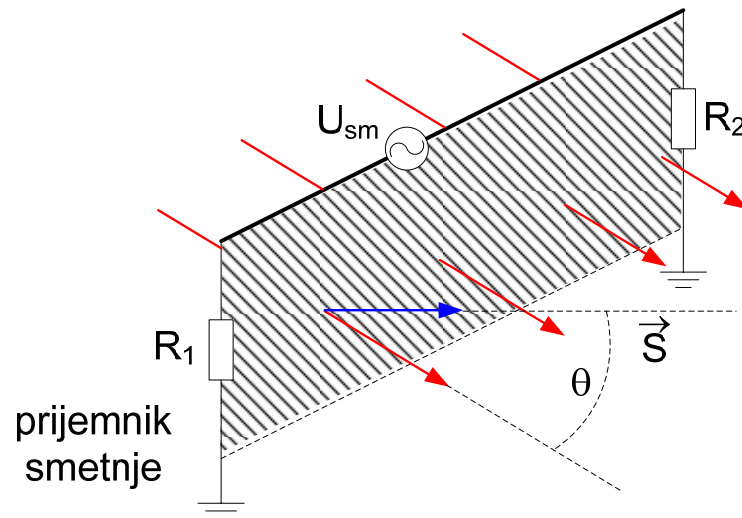
- vodič protječan strujom stvara magnetsko polje:



- na niskim frekvencijama utjecaj smetnji električnog i magnetskog polja može se razmatrati **razdvojeno** (kvazistatička aproksimacija Maxwellovih jednažbi)

Smetnje uslijed magnetskog polja (NF)

- promjenjivo magnetsko polje inducira napon smetnje prema Faradayevom zakonu:



$$U_{sm} = -\frac{d}{dt} \iint_S \vec{B} \cdot d\vec{S}$$

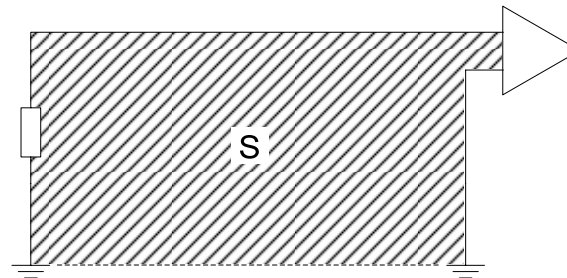
- za sinusni signal vrijedi:

$$U_{sm} = j\omega \cdot B \cdot S \cdot \cos \theta, \quad \omega \uparrow \Rightarrow U_{sm} \uparrow, \quad U_{sm} \neq f(R_1, R_2)$$

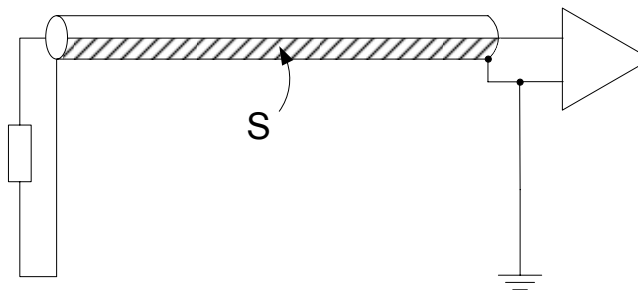
- amplituda napona smetnje uslijed magnetskog polja raste s frekvencijom i **ne ovisi** o otporima u prijamnom krugu!

Smetnje uslijed magnetskog polja (NF)

- smetnja uslijed magnetskog polja proporcionalna je površini petlje:

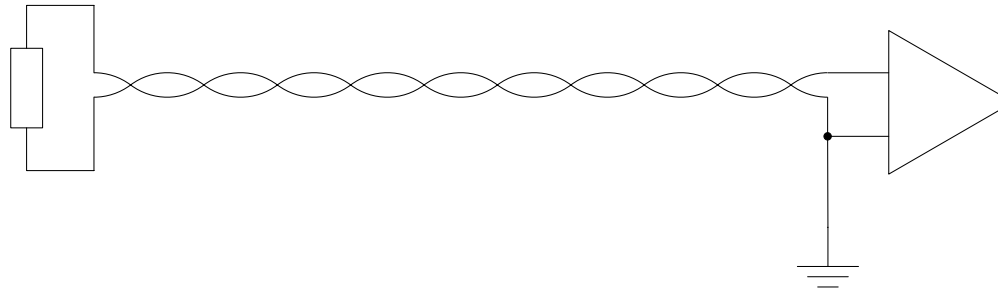


- elektrostatsko oklapanje **ne pomaže** kod magnetskih smetnji!
- ako se oklop spoji tako da predstavlja povratni put signala, onda se smanjuje površina petlje prijemnika smetnje (smetnje uslijed magnetskog polja smanjuju se **posredno**)

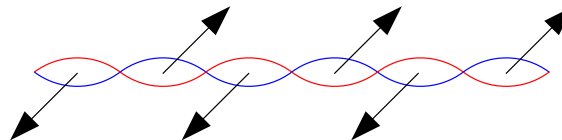


Smetnje uslijed magnetskog polja (NF)

- upredena parica (*twisted pair*) učinkovito smanjuje smetnje uslijed magnetskog polja kod prijenosa signala:

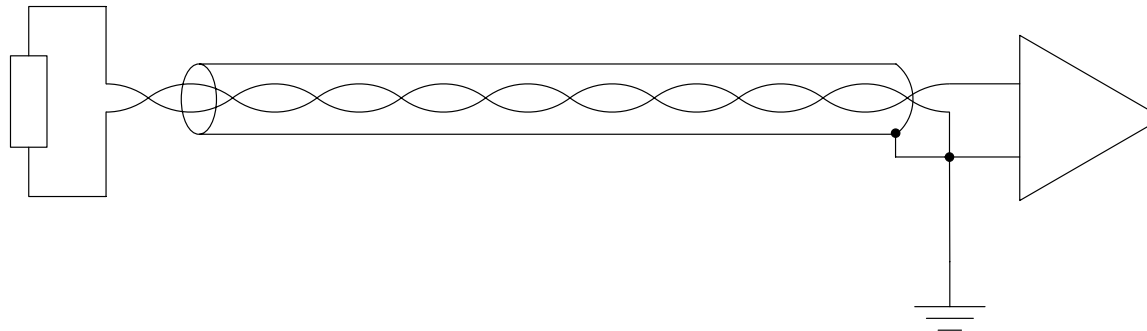


- zbog antiparalelne orijentacije vektora normale površina kod upredene parice, parcijalni inducirani naponi smetnje uzduž kabela se oduzimaju:



Smetnje uslijed magnetskog polja (NF)

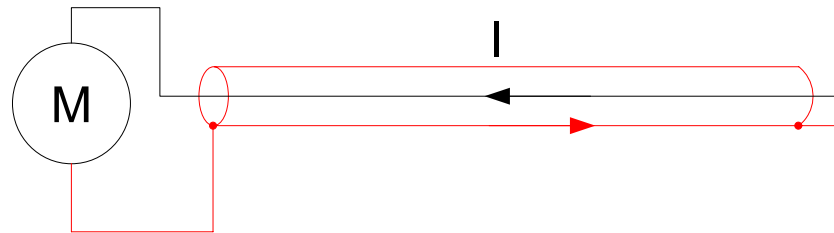
- oklopljena upredena parica (*shielded twisted pair*) očinkovito smanjuje smetnje i uslijed električnog i uslijed magnetskog polja:



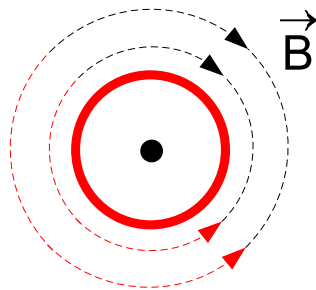
- ako je izvor signala plivajući, oklop treba uzemljiti na strani uređaja

Smetnje uslijed magnetskog polja (NF)

- **tipični izvor:** elektromotor (zbog protjecanja struje visokog iznosa)
- smanjenje emisije (izvora) smetnje – korištenje koaksijalnog oklopa koaksijalnog kabela kao povratnog voda struje elektromotora:



- takvom geometrijom vođenja struje magnetsko polje koje može uzrokovati smetnju približno se poništava na većim udaljenostima

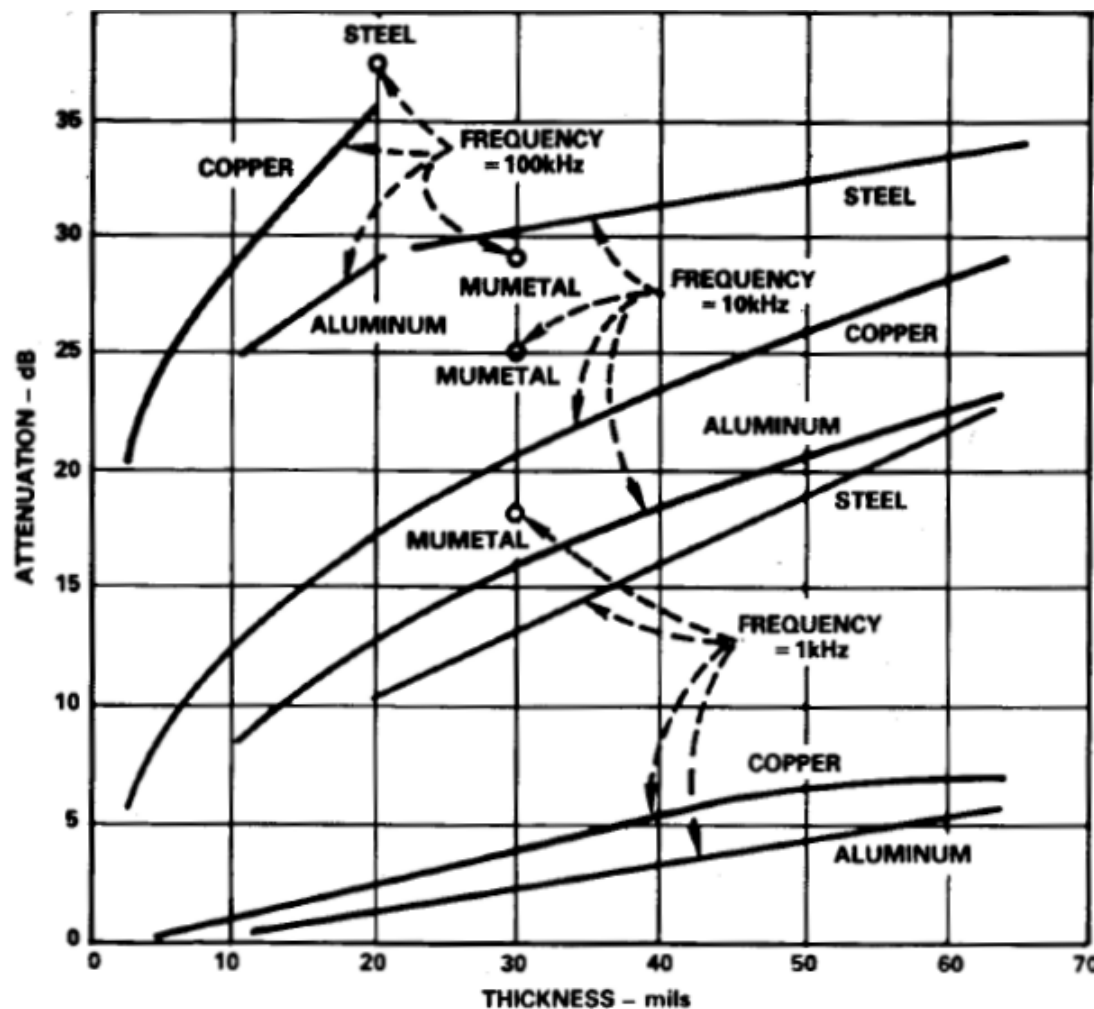


presjek koaksijalnog kabela i silnice magnetskog polja uzrokovanog dolaznom i povratnom strujom elektromotora

Magnetsko oklapanje uređaja

- elektrostatsko oklapanje – jednostavno, jer se naboj ne može nalaziti u unutrašnjosti vodiča (Faradayev kavez)
- magnetsko oklapanje – **problem**, jer magnetsko polje dobro prodire u vodljivi materijal!
- na **niskim frekvencijama** magnetsko oklapanje može se učinkovito postići oklapanjem uređaja **mu-metalom** ($\mu_r \sim 10^4 - 10^5$)
- problem: oklapanje mu-metalom učinkovito samo za slabija polja, jer ulaskom u zasićenje mu-metal više nije učinkovit!
- na višim frekvencijama bolji su drugi materijali (čelik, bakar, aluminij), dok je mu-metal neučinkovit
- kvalitetno magnetsko oklapanje puno je teže postići od elektrostatskog

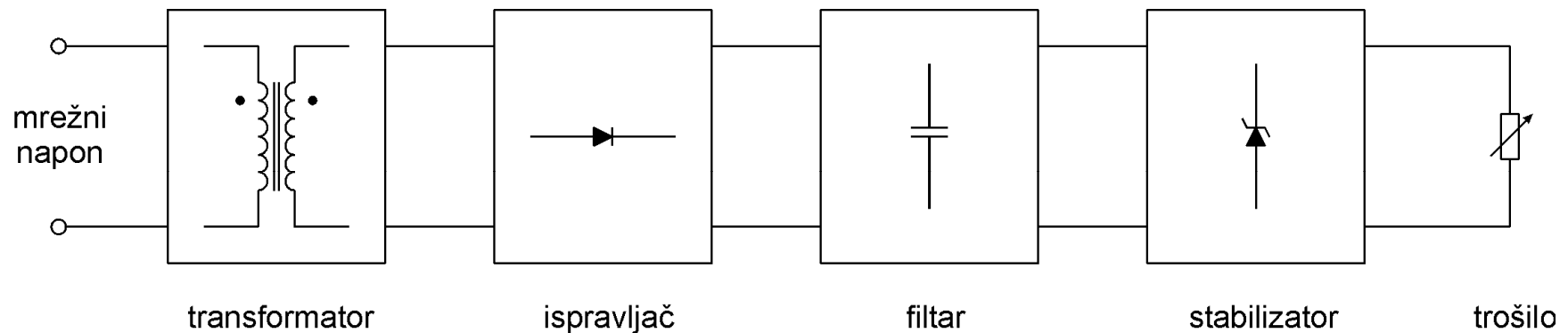
Magnetsko oklapanje uređaja



usporedba učinkovitosti magnetskog oklapanja mu-metalom ($d = 30\text{mils}$) i drugim materijalima (čelik, Cu, Al) za različite debljine oklopa i frekvencije od 1 kHz do 100 kHz

Utjecaj odabira izvora napajanja na topologiju tiskane pločice

- tipična realizacija izvora napajanja elektroničkog uređaja:

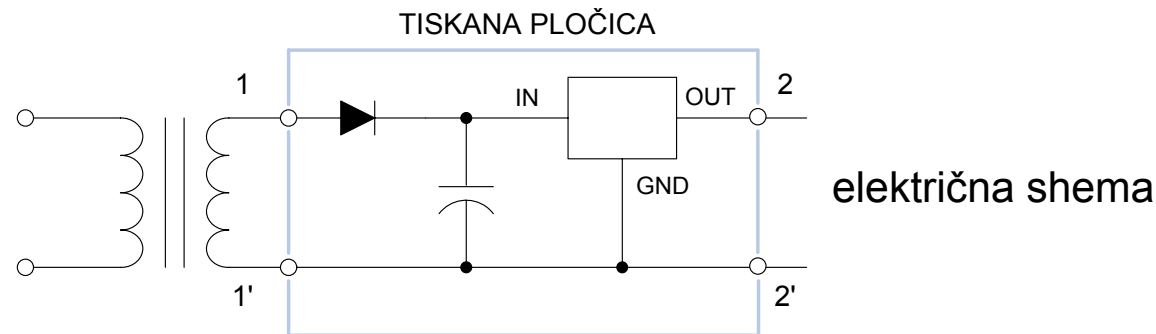


Utjecaj odabira izvora napajanja na topologiju tiskane pločice

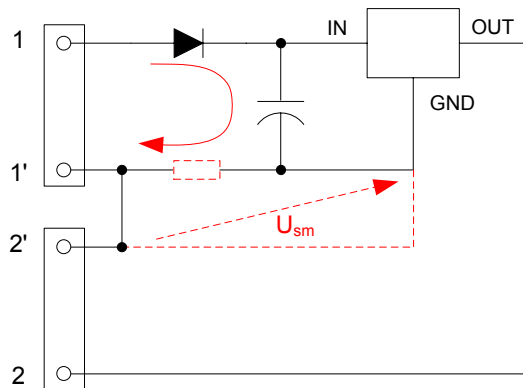
- primjeri izvedbi izvora napajanja elektroničkih uređaja:
 - transformator → ispravljač → filter → stabilizator → trošilo
 - baterija → (stabilizator) → trošilo
- uloga naponskog stabilizatora:
 - izvor konstantnog napona napajanja sklopa, čiji je iznos neovisan o promjenama ulaznog napona i opterećenju,
 - izvor mora imati što manji izlazni otpor,
 - stabilizator na izlazu mora imati što niži izmjenični napon valovitosti

Utjecaj odabira izvora napajanja na topologiju tiskane pločice

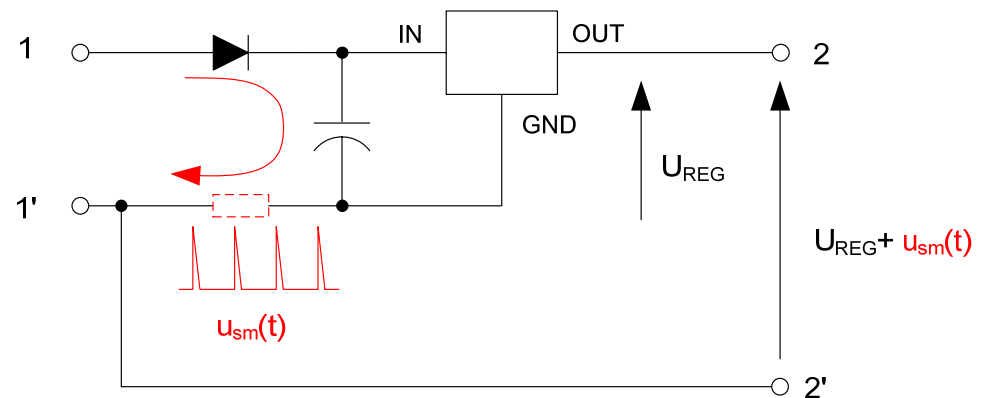
- primjer: poluvalni ispravljač + linearni stabilizator:



vodovi na tiskanoj pločici

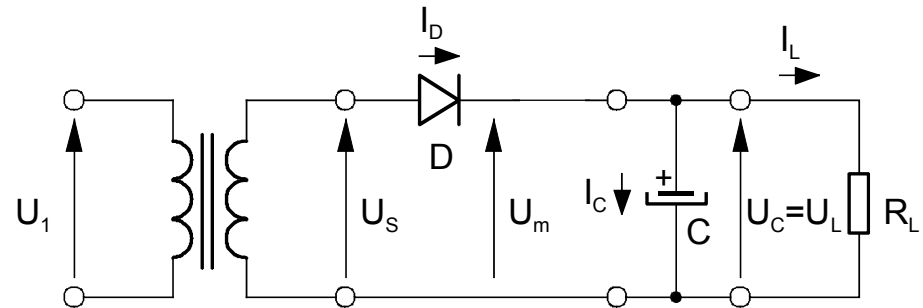
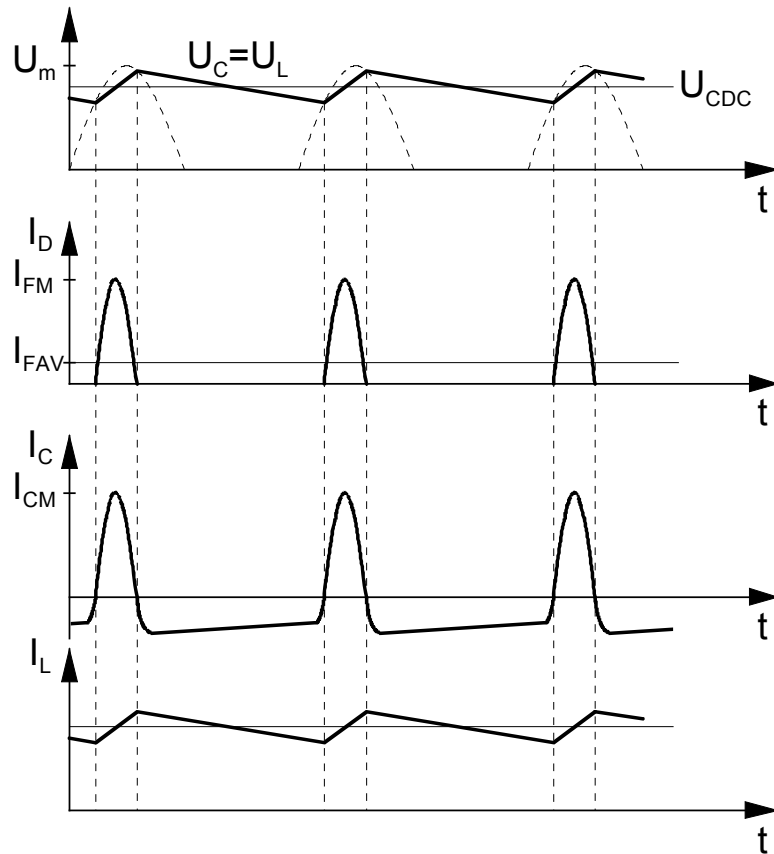


nadomjesna shema



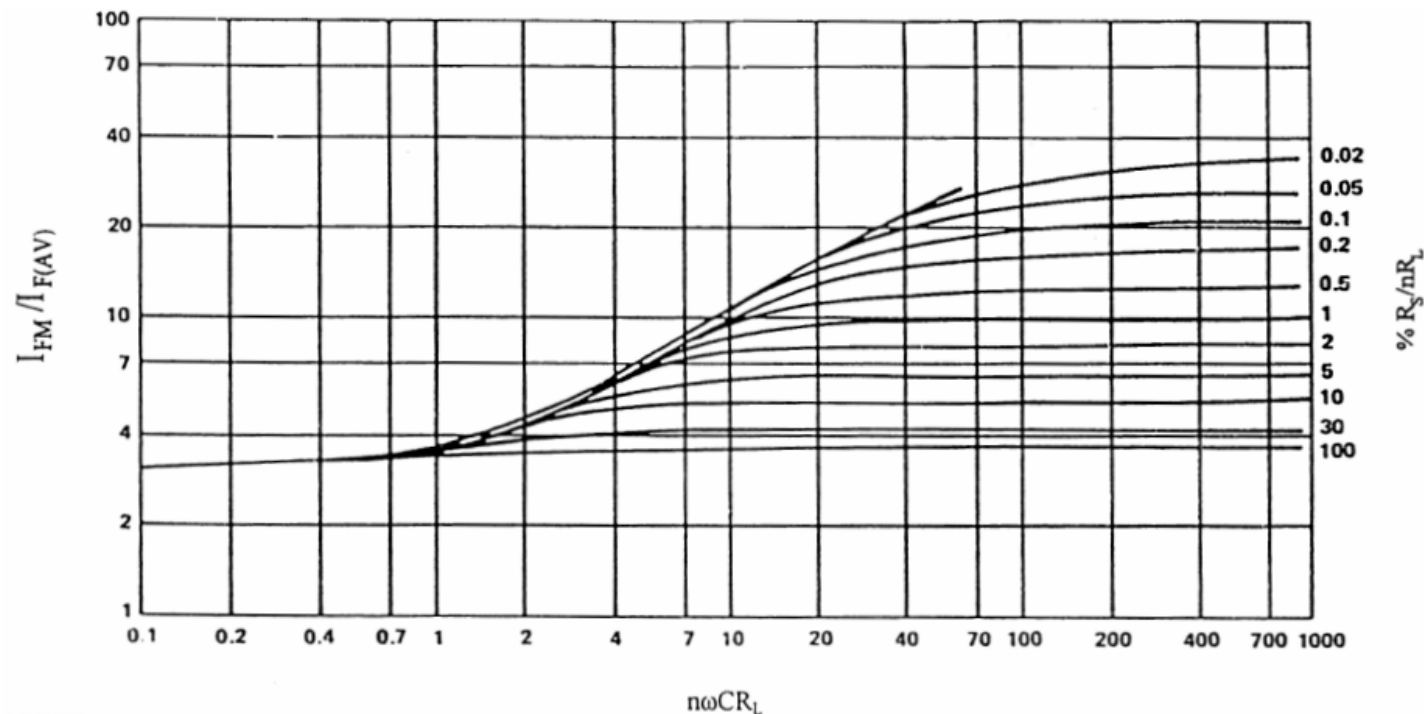
Utjecaj odabira izvora napajanja na topologiju tiskane pločice

- valni oblici napona na izlazu kapacitivno opterećenog poluvalnog ispravljača i struje kroz diodu:



Utjecaj odabira izvora napajanja na topologiju tiskane pločice

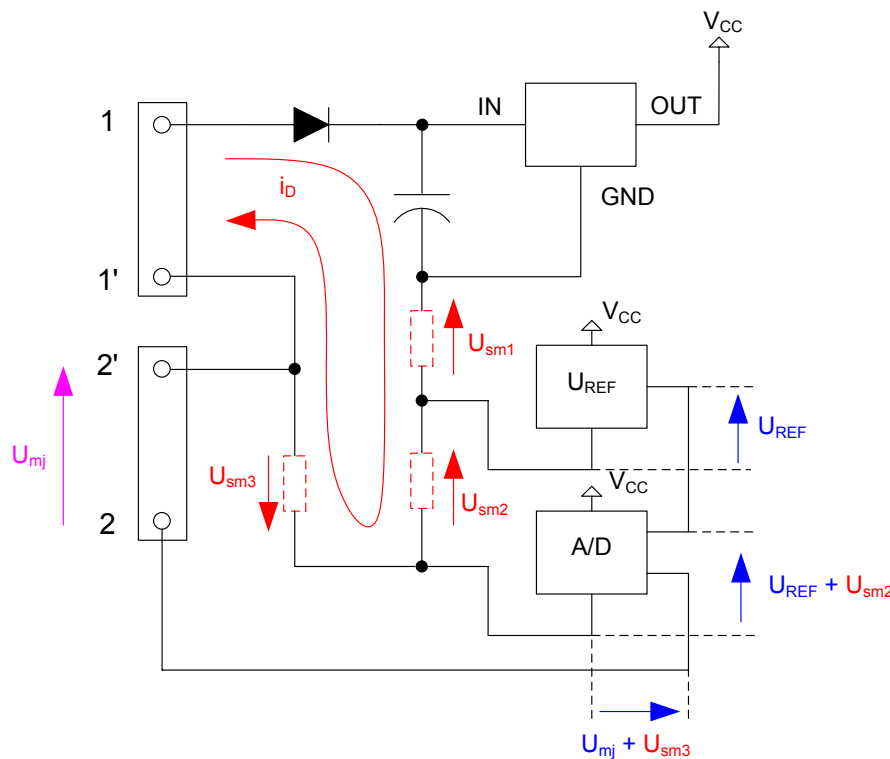
- omjer vršne i srednje struje $I_{FM}/I_{F(AV)}$ kroz ispravljačku diodu (Shadeov dijagram)



R_s – izlazni otpor sekundara, R_L – otpor trošila, C – kapacitet kondenzatora u filtru,
 ω - kružna frekvencija izmjeničnog napajanja, $n = 1$ poluvalni ispravljač, $n = 2$ punovalni ispravljač

Utjecaj odabira izvora napajanja na topologiju tiskane pločice

- vršna struja kroz diodu može biti **višestruko** (i do par desetaka puta) veća od srednje struje (struje trošila)!
- posebno je nepogodno ako se impulsna struja ispravljačke diode zatvara preko zajedničke impedancije **mase mjernog signala** (skripta str. 42):



npr. sklop troši $I_0 = 0.5 \text{ A}$, vršna struja
kroz diodu $I_{DM} = 4 \text{ A}$, otpor voda
(zajednička impedancija) $R_{PCB} = 0.025 \Omega$

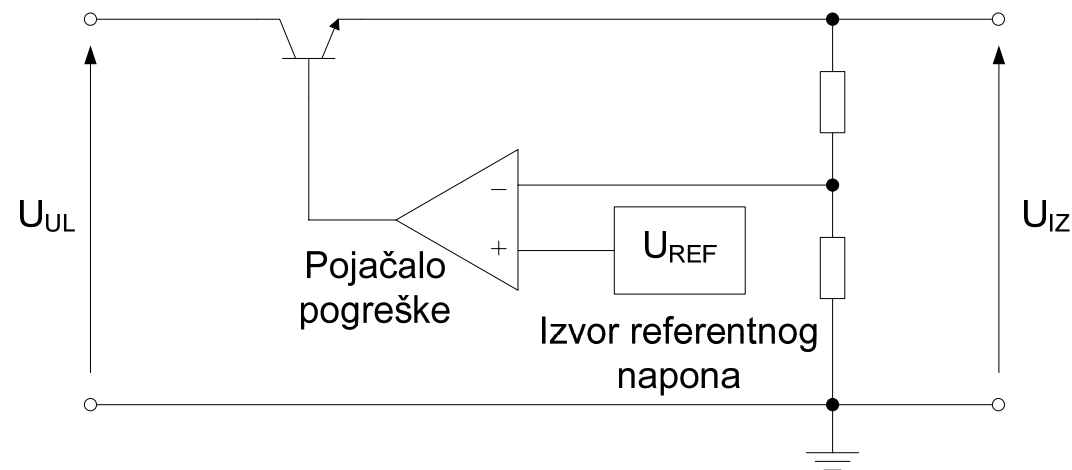
Vršna vrijednost napona smetnje na tom dijelu voda iznosi 100 mV, što se izravno preslikava u ulazni mjerni krug i superponira mjernom naponu!

Utjecaj odabira izvora napajanja na topologiju tiskane pločice

- vrste stabilizatora:
 - linearni stabilizatori
 - stabilizatori s prekidanjem struje (*switching-mode power supplies*, SMPS) ili istosmjerno-istosmjerni pretvornici (*DC-DC converters*).
 - bez galvanskog odvajanja,
 - s galvanskim odvajanjem.
- linearni stabilizatori – izlazni napon uvijek manji od ulaznog i istog polariteta,
- SMPS – izlazni napon može po iznosu biti manji, veći ili jednak ulaznom, a polaritet može biti isti ili suprotan polaritetu ulaznog napona

Linearni stabilizatori

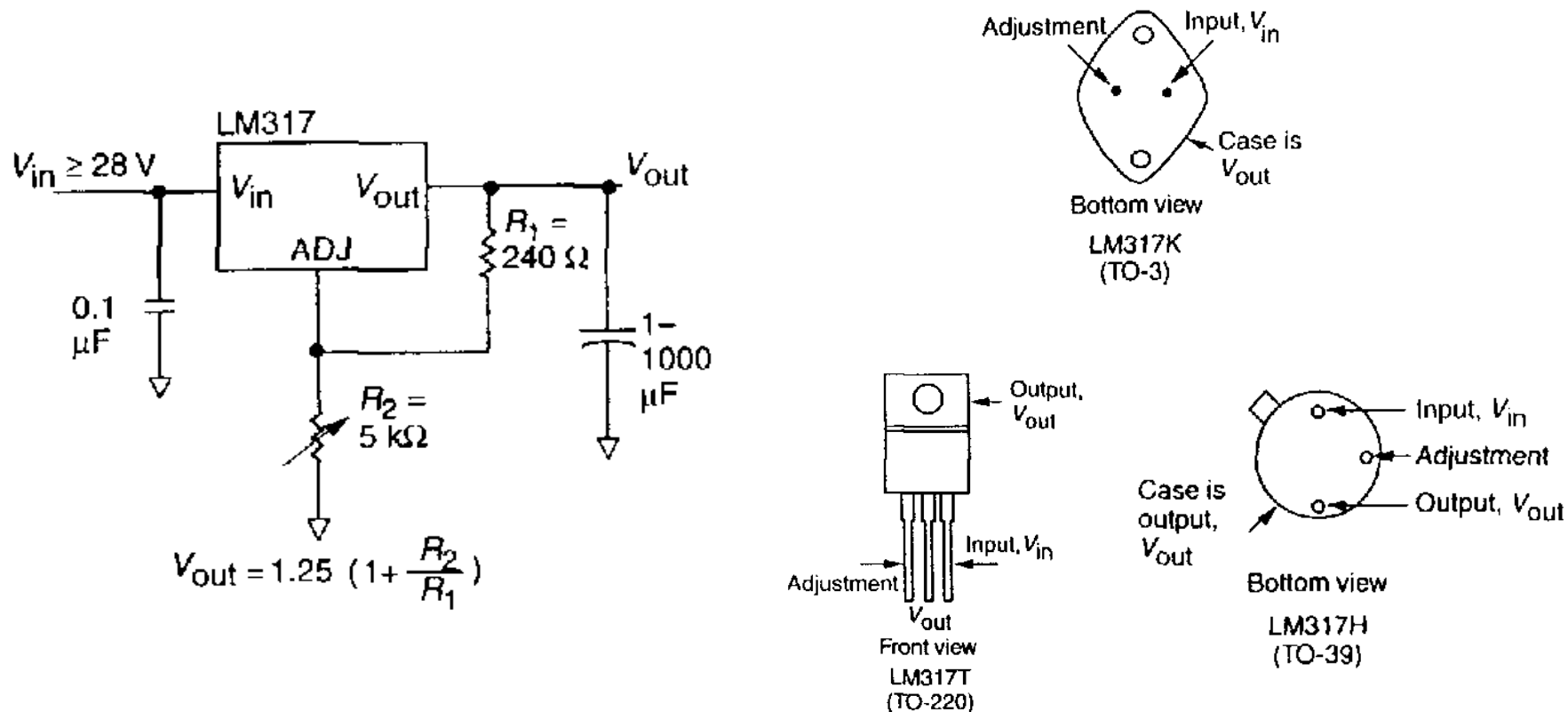
- princip rada:



- prednosti:
 - jednostavna izvedba
 - mala valovitost izlaznog napona (linearni stabilizator dodatno prigušuje ulazni napon valovitosti)
- nedostaci:
 - niska korisnost, nije pogodan za veće snage

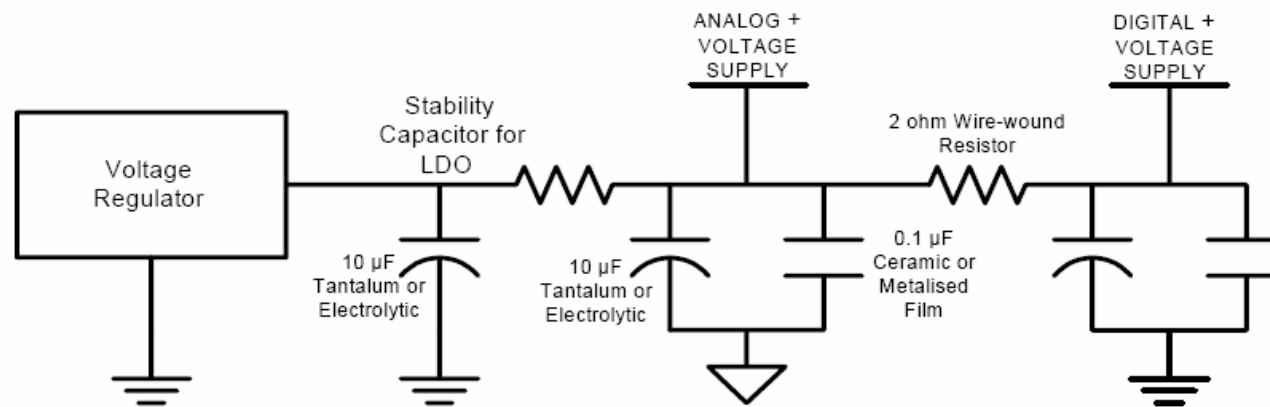
Linearni stabilizatori

- primjer primjene: promjenjivi izvor napajanja realiziran integriranim sklopom LM317:



Linearni stabilizatori

- primjer: filtriranje i razdvajanje analognog i digitalnog napajanja kada se koristi jedan linearni stabilizator



PCB Power Supply Circuit with Decoupling, Bypassing, and Isolation

Stabilizatori s prekidanjem struje

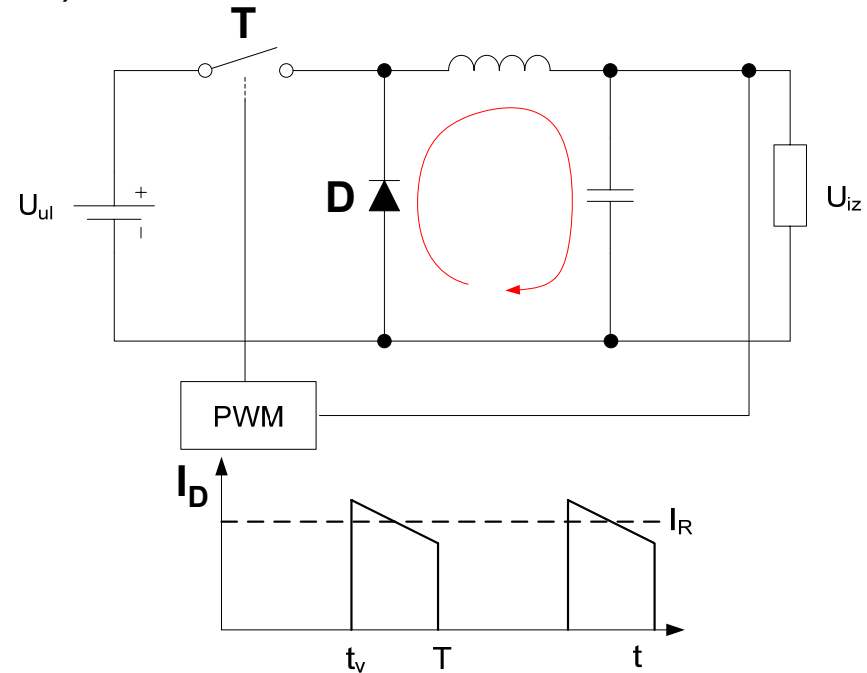
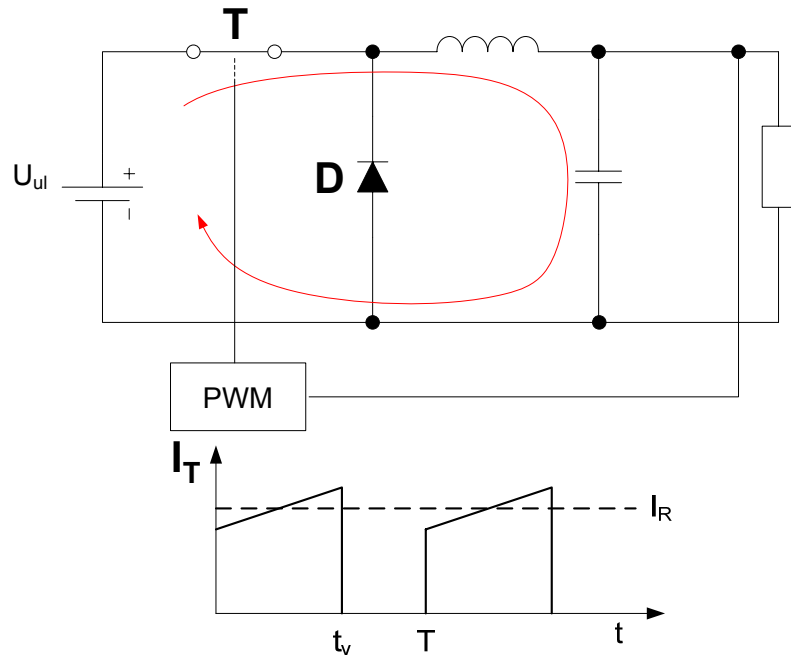
- prednosti:
 - **visoka korisnost**
 - pogodni za **veće snage**
 - mogućnost **podizanja** vrijednosti ili **promjene polariteta** ulaznog istosmjernog napona
- nedostaci:
 - relativno **visoka valovitost** izlaznog napona (valovitost je nužna za rad PWM regulatora!)
 - smetnje uslijed valovitosti napona na vodovima napajanja mogu se preslikati u osjetljive analogne sklopove
 - ponekad je dobro napraviti “post-stabilizaciju” lin. stabilizatorom
 - **jak izvor elektromagnetskih smetnji zbog prekidanja struje visokom frekvencijom!**
 - potrebna posebna pažnja kod projektiranja vodova na tiskanoj pločici oko SMPS stabilizatora

Stabilizatori s prekidanjem struje

- bez galvanskog odvajanja:
 - propusni (*buck*): $U_{iz} < U_{ul}$
 - zaporni (*boost*): $U_{iz} > U_{ul}$
 - invertirajući (*inverting*): $|U_{iz}| \leq |U_{ul}|$,
 $\text{sgn}(U_{iz}) = -\text{sgn}(U_{ul})$
- s galvanskim odvajanjem:
 - propusni (*forward*)
 - zaporni (*flyback*)
 - protutaktni (*push-pull*)

Stabilizatori s prekidanjem struje

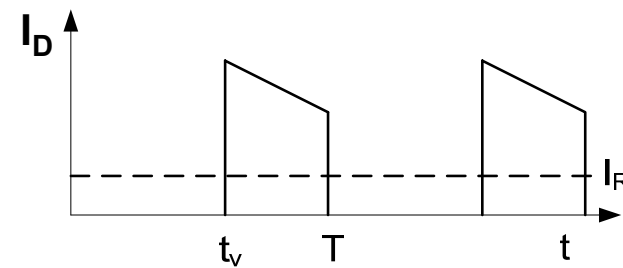
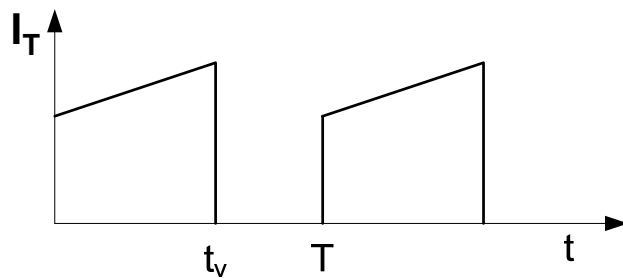
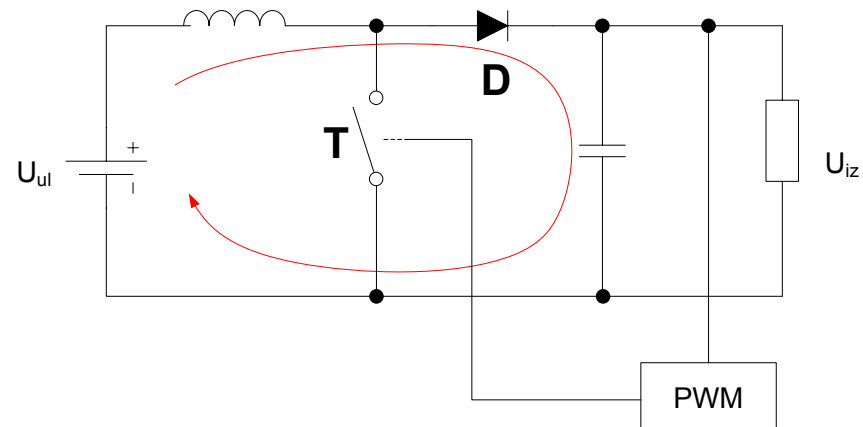
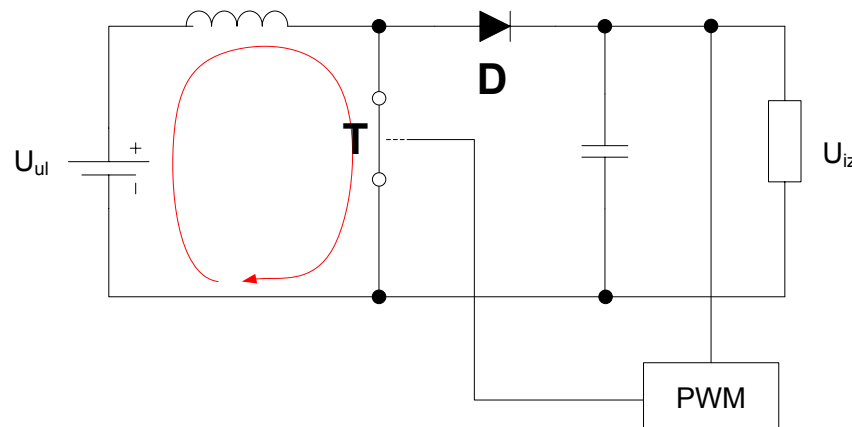
- primjer: SMPS u propusnom spoju (*buck*)



- tipične radne frekvencije SMPS stabilizatora su reda veličine kHz – MHz
- na shemama označene kritične strujne petlje koje predstavljaju jak izvor elektromagnetskih smetnji

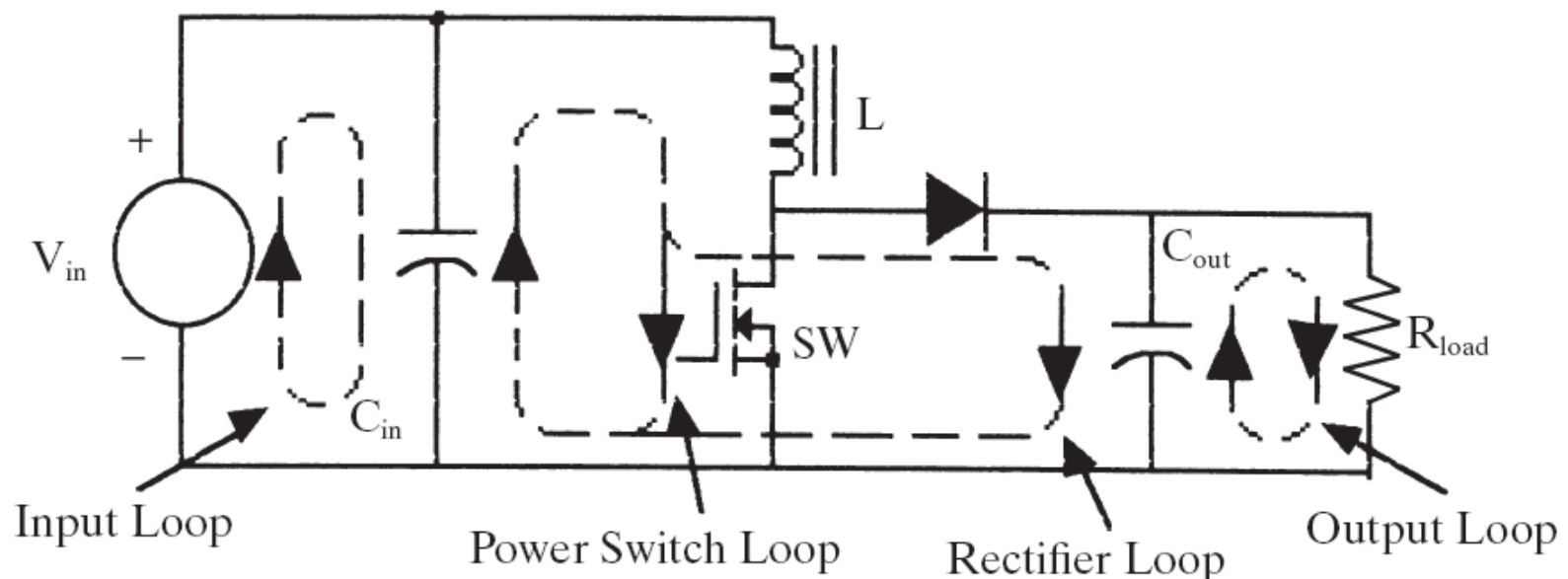
Stabilizatori s prekidanjem struje

- primjer: SMPS u zapornom spoju (*boost*) (podizanje vrijednosti ulaznog napona)



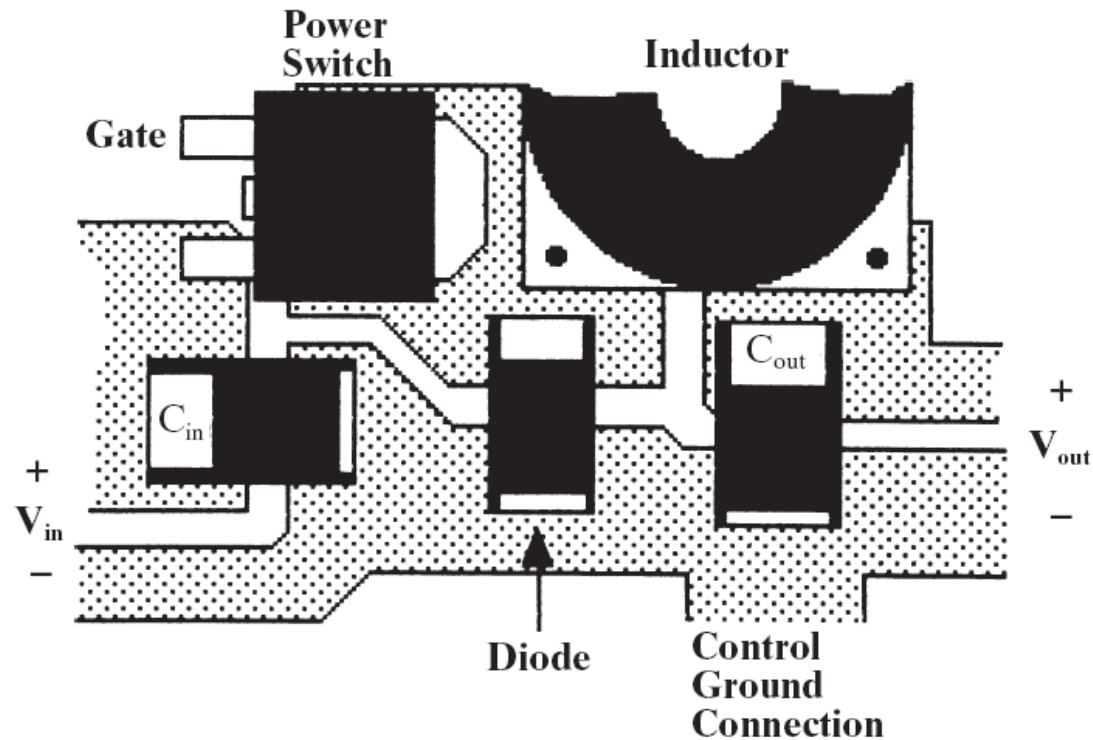
Stabilizatori s prekidanjem struje

- Četiri osnovne strujne petlje u “boost” stabilizatoru s prekidanjem struje – kritične su struja prekidačkog elementa i struja diode.



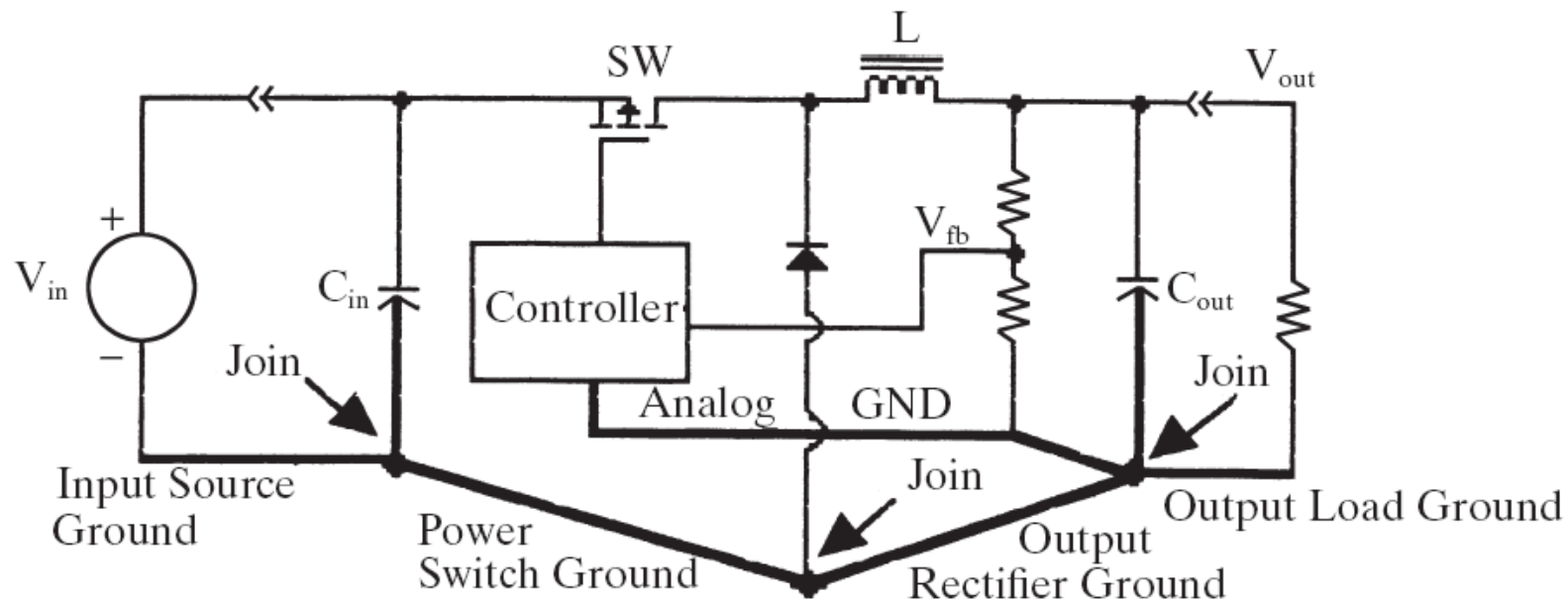
Stabilizatori s prekidanjem struje

- Izvedba tiskanih veza kritičnog dijela stabilizatora s prekidanjem struje – čim kraći i čim deblji vodovi



Stabilizatori s prekidanjem struje

- Voditi računa o pravilnom spajanju mase energetskog i upravljačkog kruga.



Integritet signala

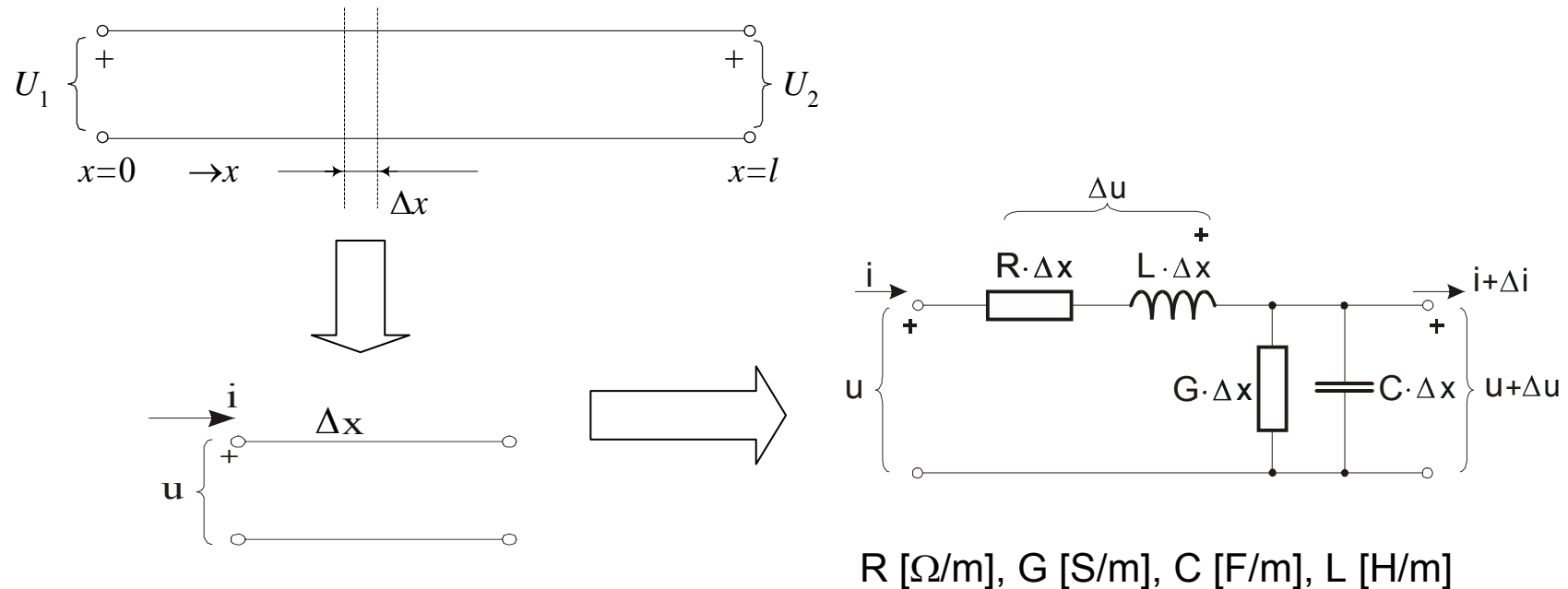
- na visokim frekvencijama tiskane vodove je potrebno razmatrati kao *električne prijenosne linije (transmission lines)*
- linijski efekti – refleksija signala!
- radi kontroliranja svojstava signala potrebno je:
 - realizirati tiskane vodove s kontroliranom karakterističnom impedancijom Z_0 (*impedance controlled routing*)
 - voditi računa o zaključenju linija karakterističnom impedancijom (*impedance matching*)
- ostali utjecaji na integritet signala: preslušavanje (*crosstalk*), *ground bounce*

Integritet signala

- **kada nije potrebno razmatrati vodove na tiskanoj pločici kao linije?**
 - analogni sklopovi: $l < \frac{300}{f_g} ; l[\text{cm}] ; f_g = f_{-3\text{dB}} [\text{MHz}]$
 - digitalni sklopovi: $l < t_r, t_f ; l[\text{cm}] ; t_r, t_f [\text{ns}]$
- osnovne tehnike kontroliranja karakteristične impedancije vodova na tiskanoj pločici:
 - *microstrip*
 - *stripline*
- **obavezno** korištenje višeslojnih tiskanih pločica s posebnim *power* i *ground plane* slojevima!

Električne prijenosne linije

- sklopovi s koncentriranim parametrima - NF
- električne prijenosne linije – valna duljina usporediva s dimenzijama sklopa



Električne prijenosne linije

- strujno-naponske prilike na prijenosnoj liniji opisuju se parom simultanih parcijalnih diferencijalnih jednačbi:

$$\frac{\partial u(x,t)}{\partial x} + R \cdot i + L \cdot \frac{\partial i(x,t)}{\partial t} = 0$$
$$\frac{\partial i(x,t)}{\partial x} + G \cdot u + C \cdot \frac{\partial u(x,t)}{\partial t} = 0$$

- valna ili karakteristična impedancija linije (u Laplaceovoj domeni):

$$Z_0 = \sqrt{\frac{R + sL}{G + sC}}$$

Električne prijenosne linije

- najjednostavniji slučaj: linija bez gubitaka ($R = 0$, $G = 0$):

$$Z_0 = \sqrt{\frac{R + \omega L}{G + \omega C}} = \sqrt{\frac{L}{C}} = konst = R_0 \quad s \rightarrow \omega \quad (\text{za sinusnu pobudu})$$

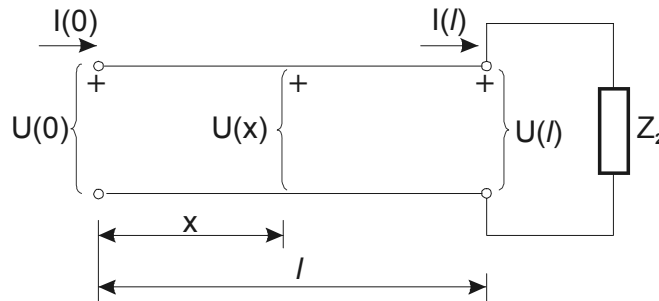
$$\alpha = 0 \quad (\text{karakteristični faktor gušenja})$$

- realniji slučaj: linija s malim gubicima ($\omega L \gg R$, $\omega C \gg G$):

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}} \cdot e^{-j\left(\frac{R}{2\omega L} - \frac{G}{2\omega C}\right)} \quad \alpha = \frac{R}{2} \sqrt{\frac{C}{L}} + \frac{G}{2} \sqrt{\frac{L}{C}}$$

Električne prijenosne linije

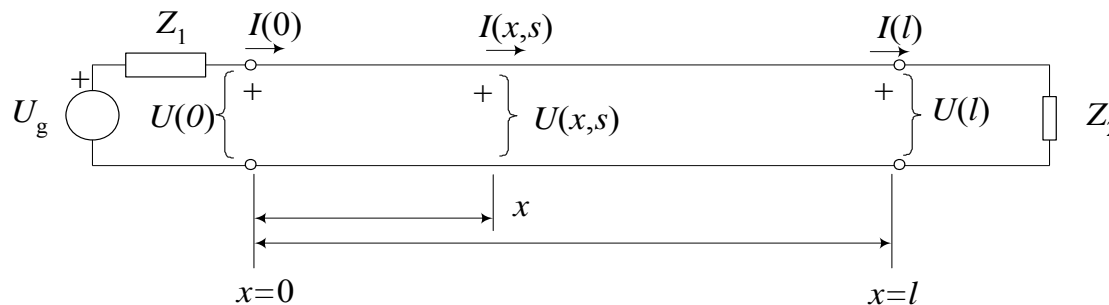
- zaključenje linije na izlazu:



$$\Gamma_2 = \frac{Z_2 - Z_0}{Z_2 + Z_0}$$

faktor refleksije na izlazu

- zaključenje na oba kraja:



$$\Gamma_1 = \frac{Z_1 - Z_0}{Z_1 + Z_0}$$

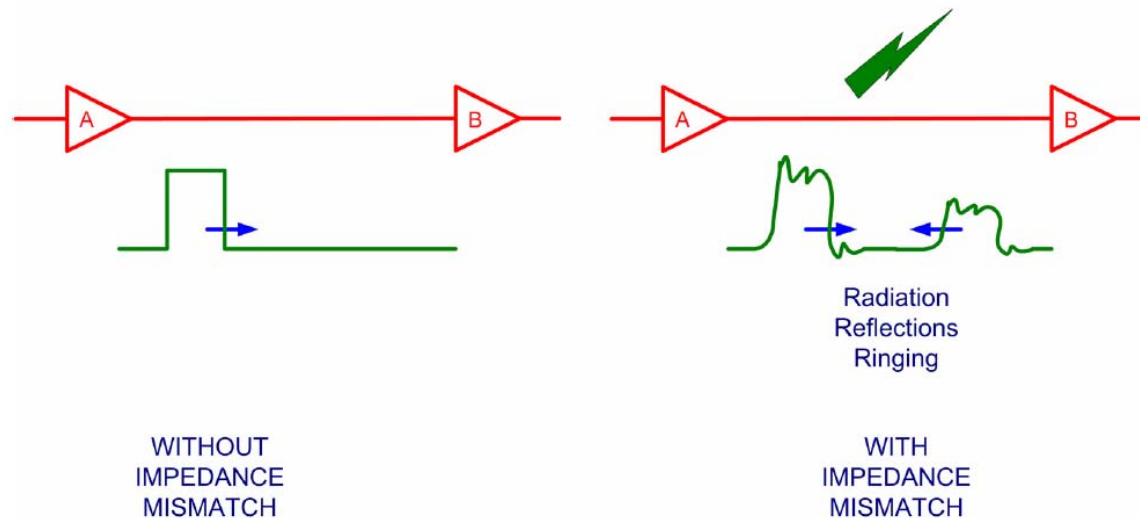
faktor refleksije na ulazu

Električne prijenosne linije

- ako je $Z_1 = Z_0$ i $Z_2 = Z_0$ tada **nema refleksija** na prijenosnoj liniji:

$$\Gamma_1 = \frac{Z_1 - Z_0}{Z_1 + Z_0} = 0 \quad \Gamma_2 = \frac{Z_2 - Z_0}{Z_2 + Z_0} = 0$$

- linija zaključena karakterističnom impedancijom se ponaša kao beskonačna linija:

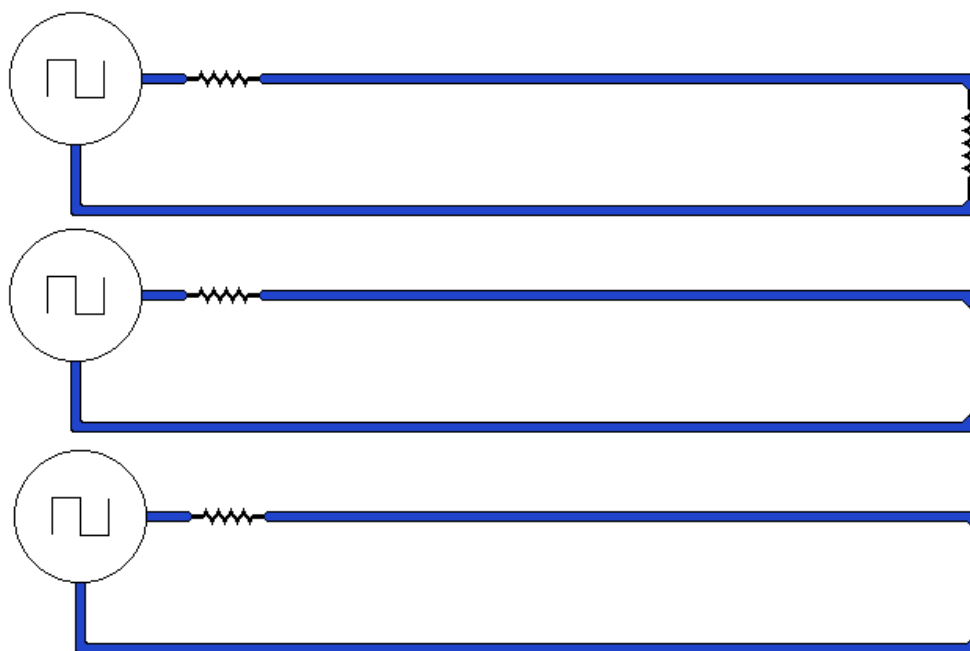


Integritet signala

- što se događa ako prijenosna linija nije zaključena?
- kod električki vrlo dugih linija moguće i višestruke refleksije
 - ovisno o frekvenciji signala i vremenu porasta pogonskog sklopa, (tj. fazi dolaznog i reflektiranog signala) moguće je aditivno ili subtraktivno djelovanje povratnog vala (istitravanje - *ringing*)
- *undershoot* (subtraktivno djelovanje) – moguća pogrešna identifikacija logičke '1' kao '0' (funktionalni problem sklopa)
- *overshoot* (aditivno djelovanje) – opasnost od pojave previsokih naponskih razina (mogućnost kvara sklopa)

Integritet signala

- primjer ponašanja prijenosne linije za različita zaključenja:



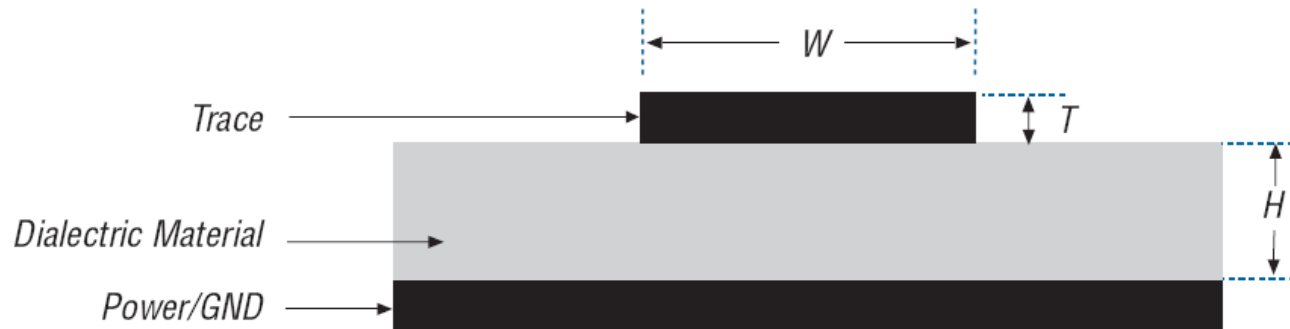
zaključenje
karakterističnom
impedancijom $Z_2 = Z_0$

zaključenje
impedancijom $Z_2 = \infty$

zaključenje
impedancijom $Z_2 = 0$

Integritet signala

- kontroliranje impedancije vodova – *microstrip*:

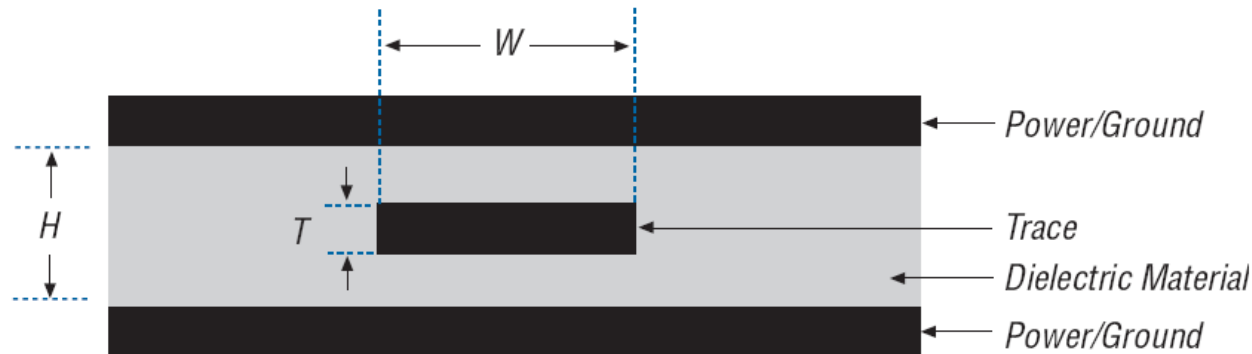


$$Z_0 = \frac{87}{\sqrt{\epsilon_r + 1.41}} \ln \left(\frac{5.98 \times H}{0.8W + T} \right) \Omega$$

parametri: W (širina voda [mil]), T (debljina bakra [mil]), ϵ_r (relativna dielektrična konstanta podloge), H (udaljenost između voda i referentnog *power/ground planea* [mil])

Integritet signala

- kontroliranje impedancije vodova – *stripline*:

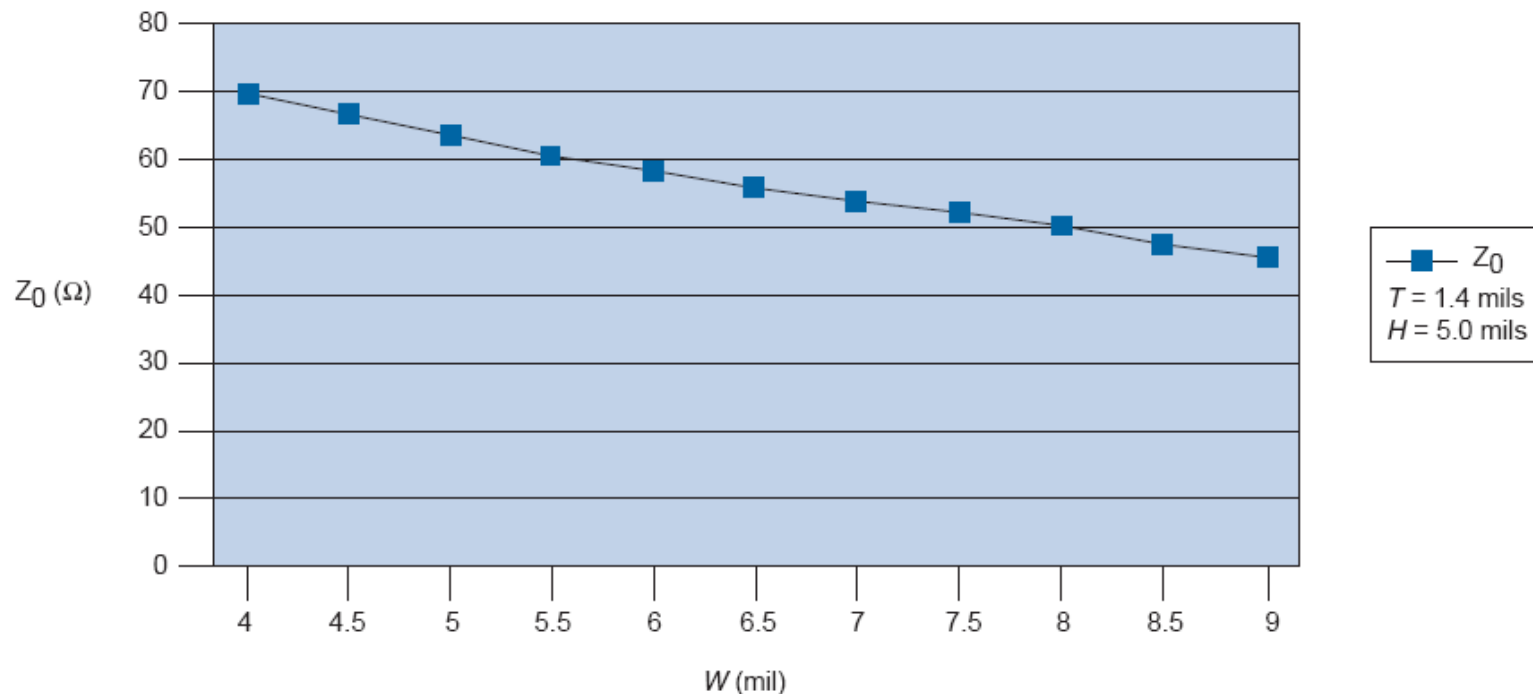


$$Z_o = \frac{60}{\sqrt{\epsilon_r}} \ln \left(\frac{4H}{0.67 \pi (T + 0.8W)} \right) \Omega$$

parametri: W (širina voda [mil]), T (debljina bakra [mil]), ϵ_r (relativna dielektrična konstanta podloge), H (visina dielektrika između dva referentna *power/ground planea* [mil])

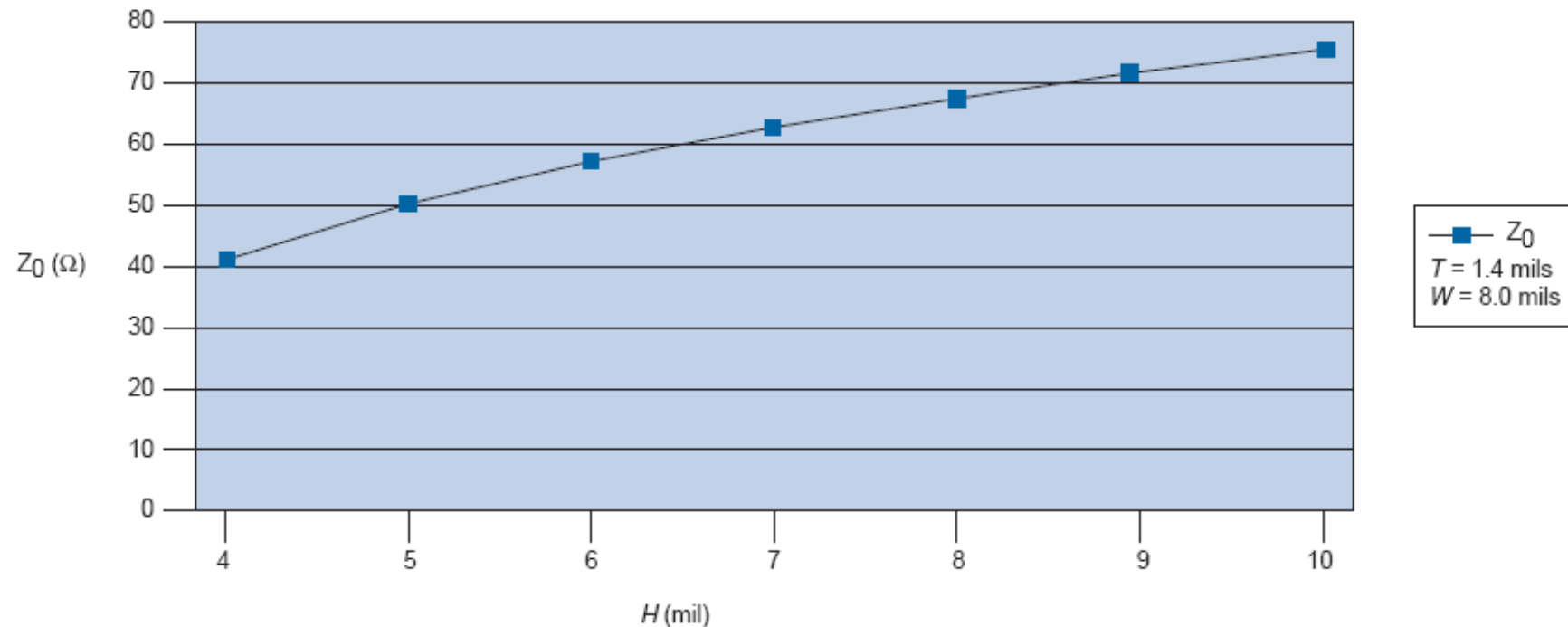
Integritet signala - *microstrip*

- primjer: $W=8$ mil, $H=5$ mil, $T=1.4$ mil ($\approx 35 \mu\text{m}$), $\epsilon_r=4.1$ (FR-4)
 $\Rightarrow \mathbf{Z_0 \approx 50 \Omega}$
- promjena karakteristične impedancije sa širinom voda:



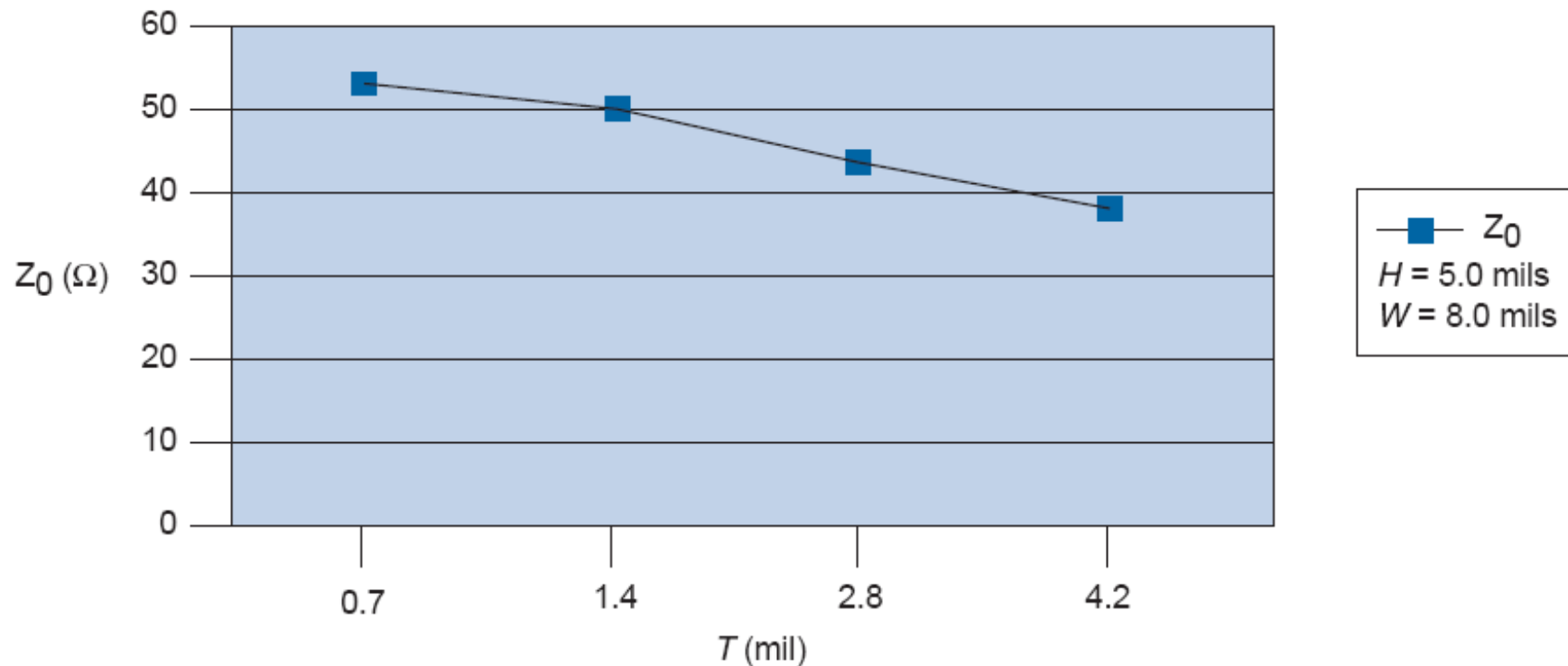
Integritet signala - *microstrip*

- promjena karakteristične impedancije s udaljenošću od referentnog *planea*:



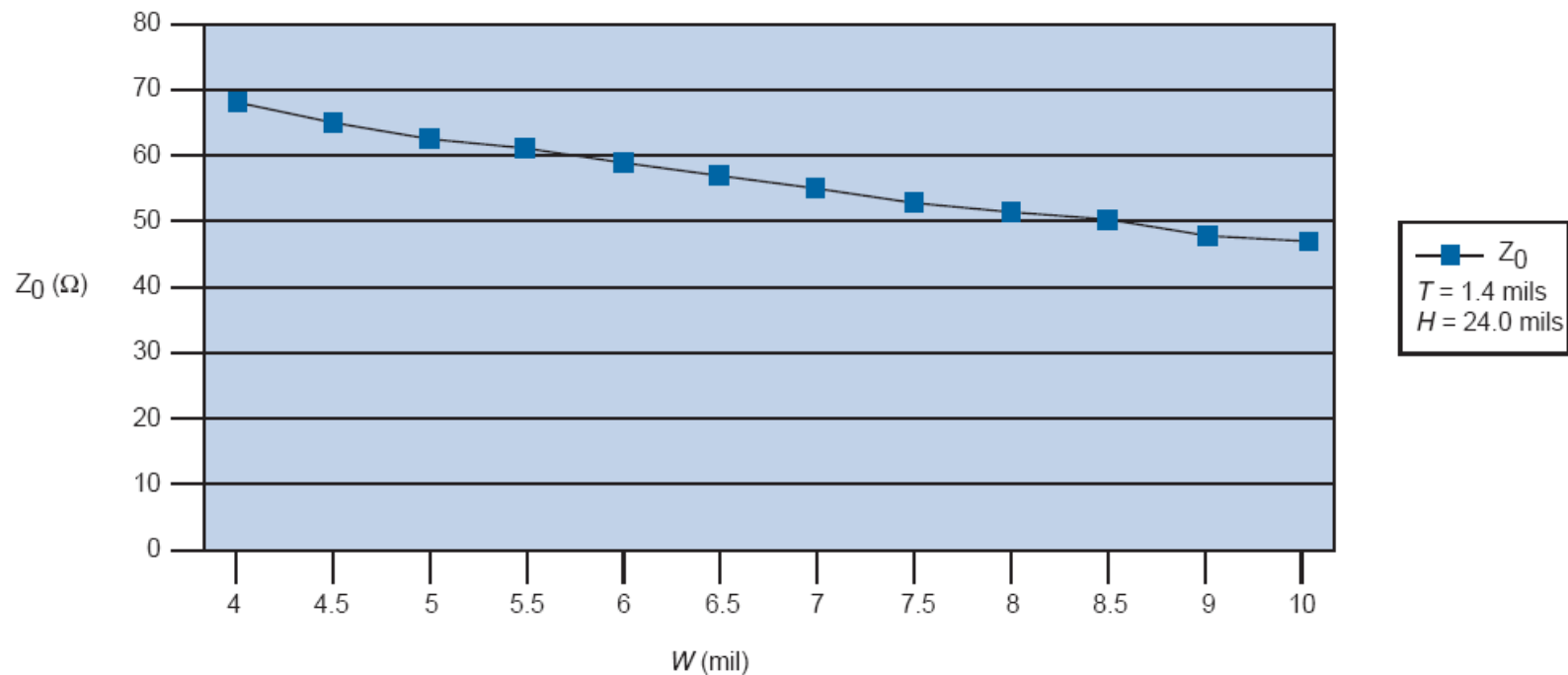
Integritet signala - *microstrip*

- promjena karakteristične impedancije s debljinom bakrenog sloja u kojem se nalazi signalni vod:



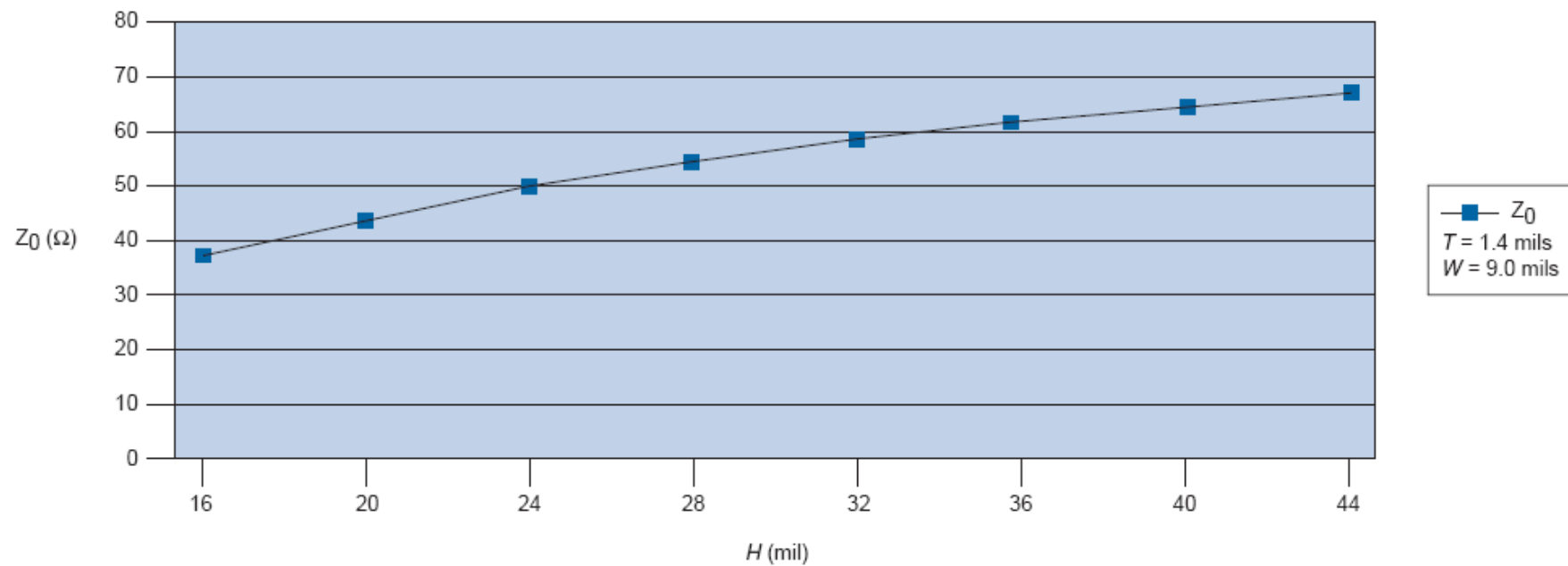
Integritet signala - *stripline*

- primjer: $W=9$ mil, $H=24$ mil, $T=1.4$ mil ($\approx 35 \mu\text{m}$), $\epsilon_r=4.1$ (FR-4)
 $\Rightarrow \mathbf{Z_0 \approx 50 \Omega}$
- promjena karakteristične impedancije sa širinom voda:



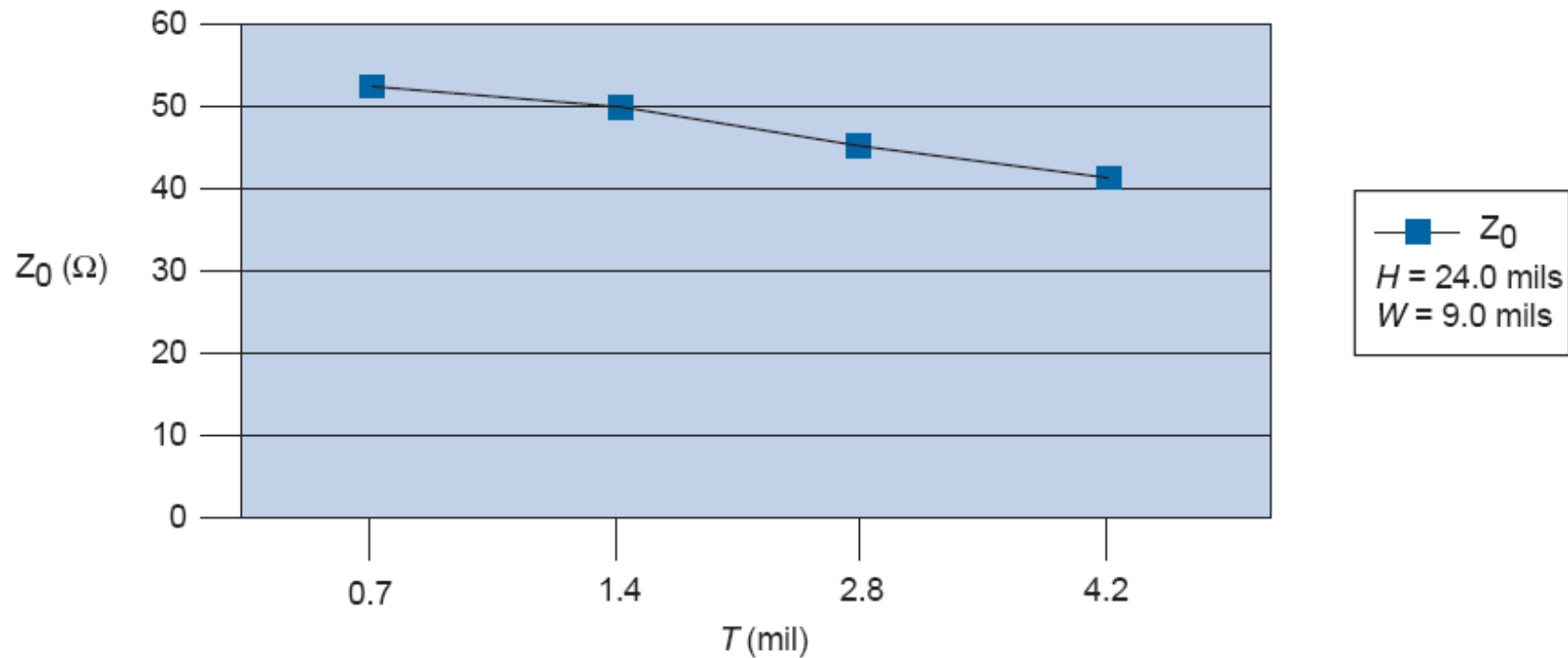
Integritet signala - *stripline*

- promjena karakteristične impedancije s visinom dielektrika između referentnih *planeova*:



Integritet signala - *stripline*

- promjena karakteristične impedancije s debljinom bakrenog sloja u kojem se nalazi signalni vod:



Integritet signala

- vrijeme kašnjenja t_p (*propagation delay*) – vrijeme potrebno signalu da prođe kroz električnu prijenosnu liniju

- vrijeme kašnjenja – *microstrip*:

$$t_p = 85 \cdot \sqrt{0.475 \cdot \epsilon_r + 0.67} \text{ [ps/inch]}$$

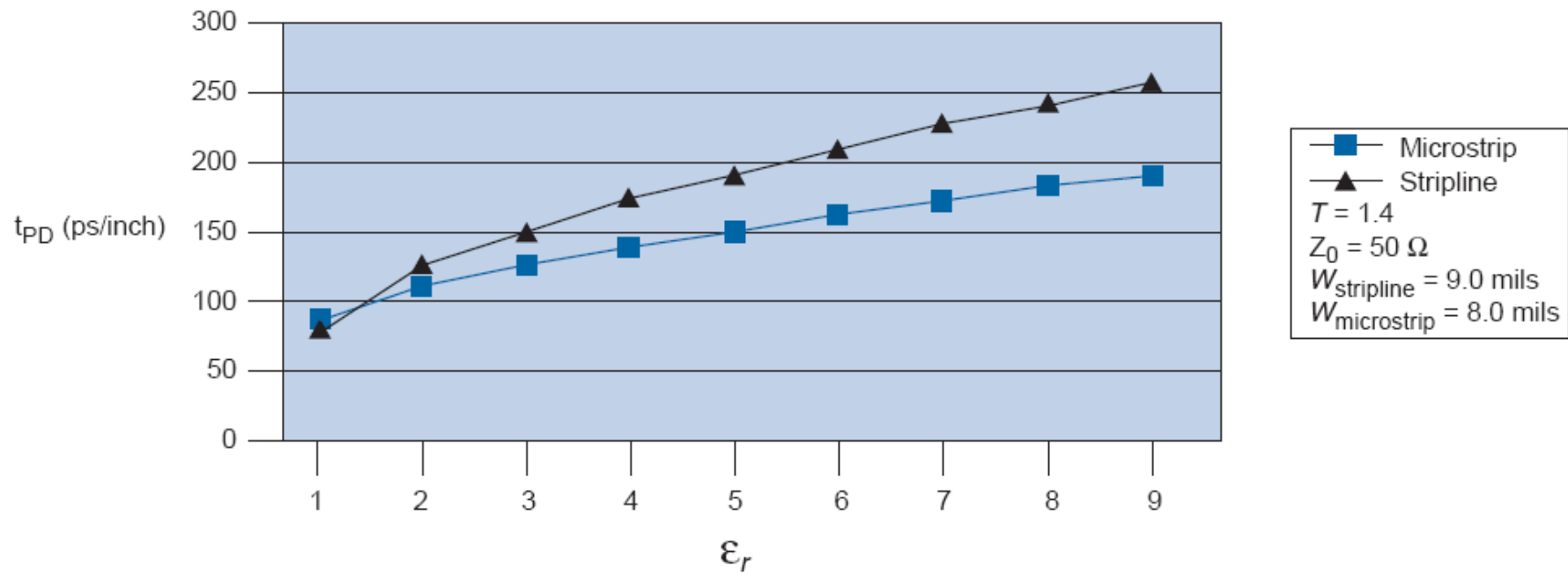
- vrijeme kašnjenja – *stripline*:

$$t_p = 85 \cdot \sqrt{\epsilon_r} \text{ [ps/inch]}$$

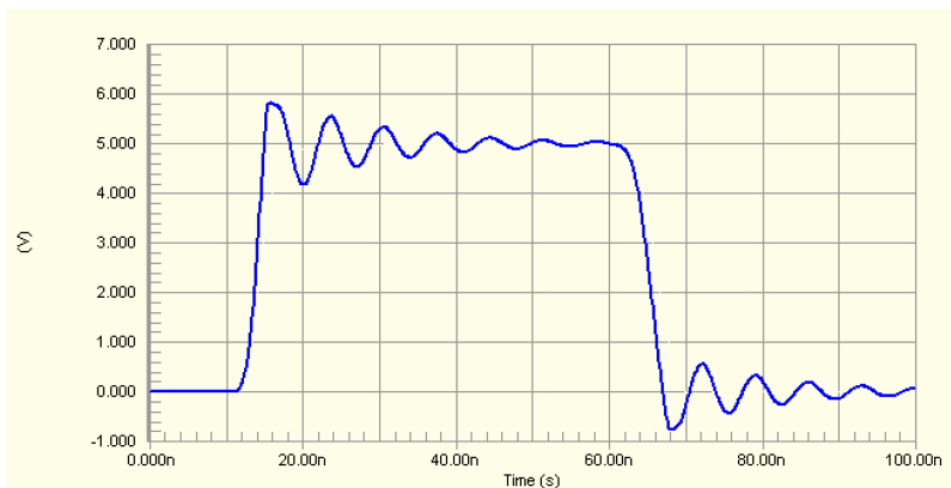
- ako je vrijeme propagacije signala kroz liniju dulje od vremena porasta signala na izvoru, onda se električni vod mora razmatrati kao linija!

Integritet signala

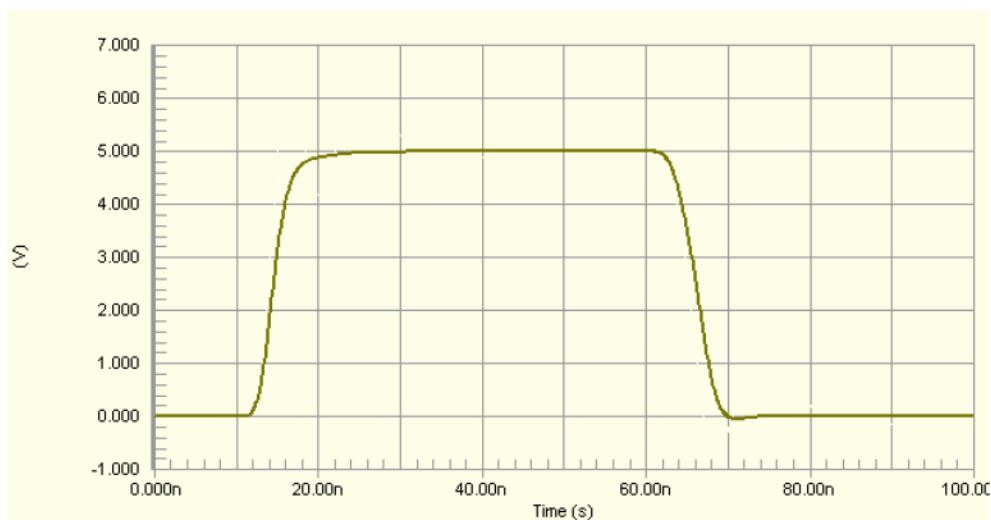
- usporedba vremena kašnjenja za *microstrip* i *stripline* topologije:



Integritet signala



pojava istitravanja na
neispravno zaključenoj liniji



valni oblik naponskog impulsa
na ispravno zaključenoj liniji

Integritet signala

- kada je potrebno liniju zaključiti?
 - ako je t_r [ns] vrijeme porasta signala na izlazu pogonskog sklopa i t_p [ns] vrijeme propagacije signala, maksimalna dozvoljena duljina linije bez zaključenja L_{\max} [cm] je

$$L_{\max} = \frac{t_r}{2t_p}$$

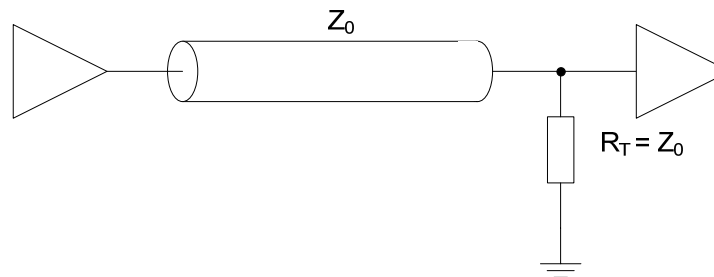
- relativno jednostavan odgovor može se dati samo za vodove s kontroliranom impedancijom:
 - *microstrip*: $L_{\max} = 9 \cdot t_r$ [cm, ns]
 - *stripline*: $L_{\max} = 7 \cdot t_r$ [cm, ns]
- primjeri:
 - *microstrip*: $t_r = 2 \text{ ns} \Rightarrow L_{\max} = 9 \cdot t_r = 18 \text{ cm}$
 - *stripline*: $t_r = 2 \text{ ns} \Rightarrow L_{\max} = 7 \cdot t_r = 14 \text{ cm}$

Integritet signala

- zaključenje vodova na tiskanoj pločici:
 - prilagodba impedancije na prijamniku
 - prilagodba impedancije na pogonskom sklopu
- metode prilagodbe impedancije:
 - paralelno zaključenje (*parallel termination*)
 - paralelno zaključenje prema Theveninu (*Thevenin parallel termination*)
 - serijsko-RC paralelno zaključenje (*series-RC parallel termination*)
 - serijsko zaključenje (*series termination*)
 - zaključenje diodama (*diode termination*)

Integritet signala

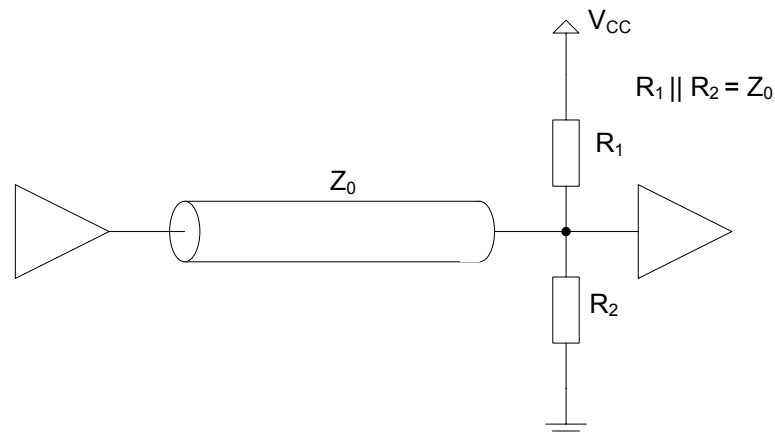
- paralelno zaključenje (*parallel termination*):



- zaključenje električne linije otpornikom iznosa jednakim karakterističnoj impedanciji linije Z_0 (što bliže ulaznom pinu prijamnika!)
- nedostatak: visoka potrošnja i mogućnost značajnog pomaka vrijednosti logičkih naponskih razina na prijemniku
- neprikladno za sustave s niskom potrošnjom (npr. za $U_{CC}=5V$ i $R_T=50\ \Omega$ zaključenje troši 100 mA!)

Integritet signala

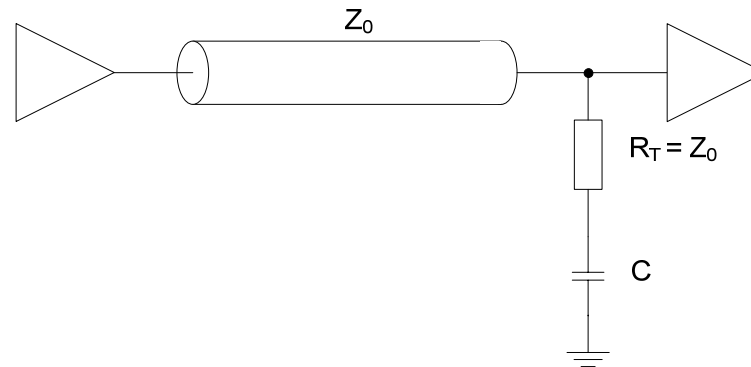
- paralelno zaključenje prema Theveninu (*Thevenin parallel termination*):



- prednost: bolje balansiranje pomaka logičkih naponskih razina na prijemniku od slučaja paralelnog zaključenja
- nedostatak: razmjerno visoka potrošnja

Integritet signala

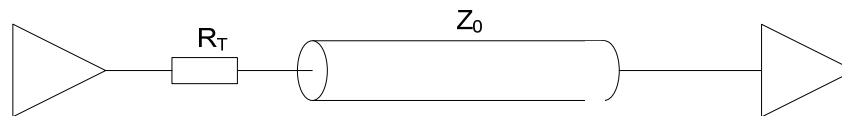
- serijsko-RC paralelno zaključenje (*series-RC parallel termination*):



- prednost: nema disipacije na R_T u stacionarnom stanju
- nedostatak: preveliki C može previše usporiti signal, a premaleni C čini zaključenje neefikasnim (tipično se koriste $C = 20 - 600 \text{ pF}$)

Integritet signala

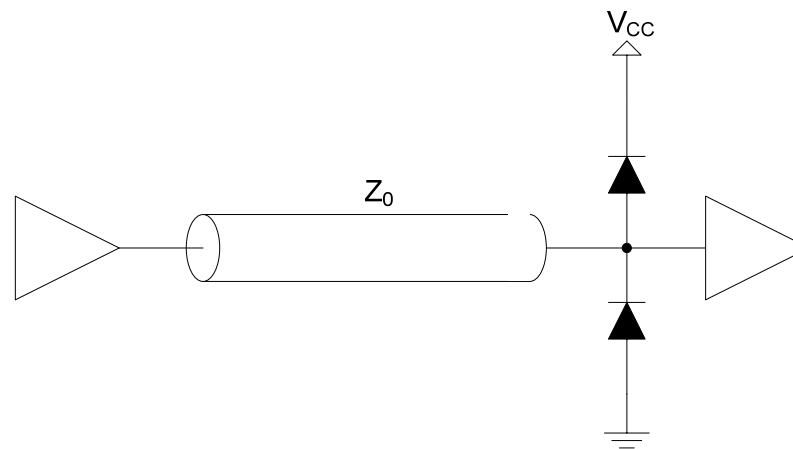
- serijsko zaključenje (*series termination*):



- koristi se za prilagođenje izlaznog otpora izvora karakterističnoj impedanciji linije (npr. kod izvora s malim izlaznim otporom)
- smanjuje sekundarne refleksije na izvoru (npr. kod nezaključenih linija)
- R_T se mora postaviti fizički što bliže izvoru signala (odašiljaču)

Integritet signala

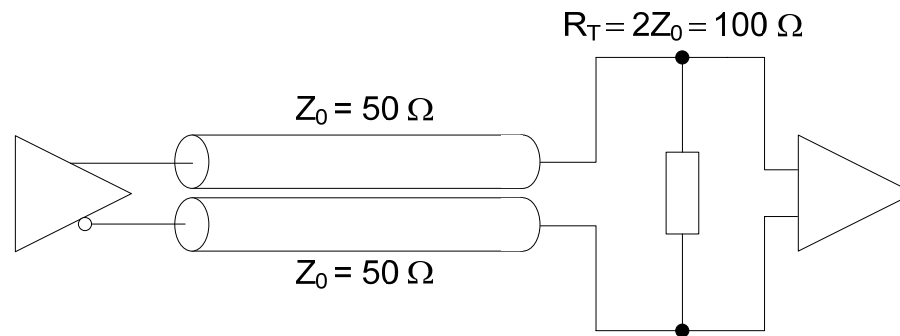
- zaključenje diodama (*diode termination*):



- diode eliminiraju nadvišenja na prijamniku uslijed neodgovarajućeg zaključenja prijenosne linije
- ne utječu na karakterističnu impedanciju linije
- niska potrošnja (za razliku od paralelnog ili Theveninovog zaključenja)
- preporučljivo koristiti brze diode (Schottky)

Integritet signala

- zaključenje diferencijalnih signala (*differential pair termination*):



- koristi se za prilagođenje linija s diferencijalnim signalima (npr. za LVDS signale (*Low-voltage differential signaling*))

Integritet signala

- usporedba različitih tehnika zaključenja prijenosnih linija na tiskanoj pločici:

Tip zaključenja	Relativna cijena	Uneseno kašnjenje	Potrošnja
serijsko	niska	značajno	niska
paralelno	niska	maleno	visoka
RC	srednja	maleno	srednja
Thevenin	srednja	maleno	visoka
diodno	visoka	maleno	niska

Integritet signala

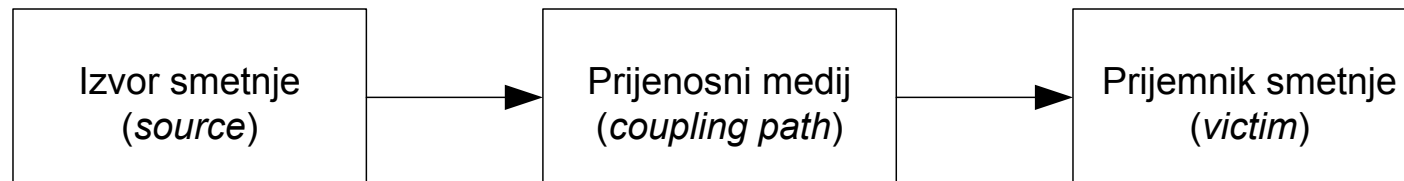
<i>Logic Family</i>	<i>Rise/Fall Time (Approx.) T_r</i>	<i>Maximum Non- transmission Line Trace Length (Microstrip) $L_{max} = 9 \times T_r$</i>	<i>Maximum Non- transmission Line Trace Length (Stripline) $L_{max} = 7 \times T_r$</i>
74L xxx	31–35 ns	279 cm (110")	217 cm (85.4")
74C xxx	25–60 ns	225 cm (88.5")	175 cm (69")
CD4 xxx (CMOS)	25 ns	225 cm (88.5")	175 cm (69")
74HC xxx	13–15 ns	117 cm (46")	91 cm (36")
74 xxx (flip-flop)	10–12 ns	90 cm (35.5")	70 cm (27.5")
	15–22 ns	135 cm (53")	105 cm (41")
74LS xxx (flip-flop)	9.5 ns	85.5 cm (34")	66.5 cm (26")
	13–15 ns	117 cm (46")	91 cm (36")
74H xxx	4–6 ns	36 cm (14.2")	28 cm (11")
74S xxx	3–4 ns	27 cm (10.5")	21 cm (4.3")
74HCT xxx	5–15 ns	45 cm (18")	35 cm (14")
74ALS xxx	2–10 ns	18 cm (7")	10 cm (4")
74ACT xxx	2–5 ns	18 cm (7")	10 cm (4")
74F xxx	1.5–1.6 ns	10.5 cm (4")	10.5 cm (4")
ECL 10K	1.5 ns	10.5 cm (4")	10.5 cm (4")
ECL 100K	0.75 ns	6 cm (3")	5.25 cm (2")

Integritet signala

- Altium Designer omogućava analizu integriteta signala:
 - *pre-layout signal integrity (SI) analysis* – na električnoj shemi (potrebno zadati približne srednje duljine vodova neke mreže i karakterističnu impedanciju)
 - *post-layout signal integrity (SI) analysis* – na tiskanoj pločici (iz topologije vodova; moguća i simulacija preslušavanja (*crosstalk*))
- IBIS modeli (*Input Output Buffer Information Specification*) – EIA (*Electronic Industries Alliance*) standard za modeliranje I/O međusklopova u programskim paketima za analizu SI

Elektromagnetska kompatibilnost

- *elektromagnetska kompatibilnost* - utjecaj **neželjeno** generirane elektromagnetske (EM) energije na rad elektroničkih uređaja
- osnovni pojmovi:
 - *electromagnetic compatibility* (EMC)
 - karakteristika uređaja da neometano funkcioniра u okruđu EM smetnji i da ne generira EM smetnje drugim uređajima
 - *electromagnetic interference* (EMI)
 - proces prijenosa neželjene EM energije s jednog uređaja na drugi
 - *radiated* EMI – prijenos EM smetnji kroz slobodni prostor (antene)
 - *conducted* EMI – prijenos EM smetnji kroz vodljivi medij (kabeli)



Elektromagnetska kompatibilnost

- osnovni aspekti EMC-a:
 - emisija EM smetnji (*emissions*)
 - opisuje u kojoj mjeri uređaj generira neželjeni EMI
 - osjetljivost na EM smetnje (*susceptibility*)
 - opisuje u kojoj mjeri uređaj otporan na EMI
 - u to se ubraja ne samo *radiated/conducted* EMI, već i:
 - EOS (*Electrical overstress*) – prenaponi
 - ESD (*Electrostatic discharge*) – elektrostatski izboji
- cilj dobrog EMC dizajna:
 - zadovoljiti međunarodnu i domaću **zakonsku** regulativu
 - zadovoljiti posebne (dobrovoljne) industrijske norme

Elektromagnetska kompatibilnost

- zakonska regulativa
 - Federal Communications Commission (FCC) (USA)
 - International Special Committee on Radio Interference (CISPR)
(Comité International Spécial des Perturbations Radioélectriques)
(IEC) – većina ostalih zemalja (EU)
- FCC klase uređaja:
 - Class A – “... device for use in commercial, industrial or business environment ...”
 - Class B – “... device for use in residential environment...”
- EN klase uređaja:
 - Class A ,Class B – slične definicije kao FCC
- na komercijalne uređaje koji se koriste npr. u domaćinstvu postavljaju se stroži zahtjevi na EMC!

Elektromagnetska kompatibilnost

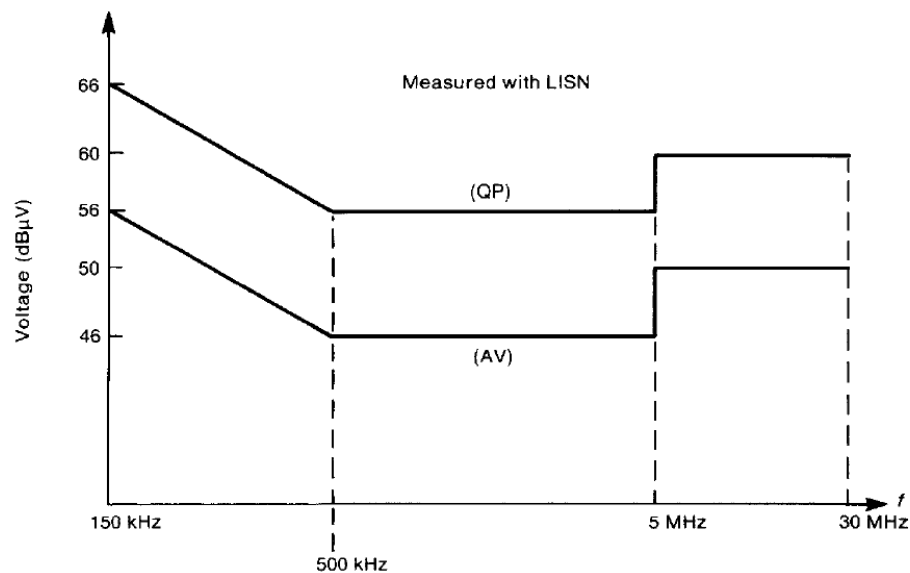
- FCC/CISPR regulativa:
 - odnosi se na digitalne uređaje s min. frekvencijom signala vremenskog vođenja **9 kHz!**
 - *conducted interference* – 150 kHz – 30 MHz
 - *radiated emissions* – 30 MHz – 1000 MHz (može i više, ovisno o frekvenciji signala vremenskog vođenja (harmonici i do 40 GHz))
 - testiranje – posebne komore (*anechoic chambers*) ili otvoreni prostor
- zakonski nije dopušteno prodavati uređaje koji nisu prošli postupak EMC certifikacije!

Elektromagnetska kompatibilnost

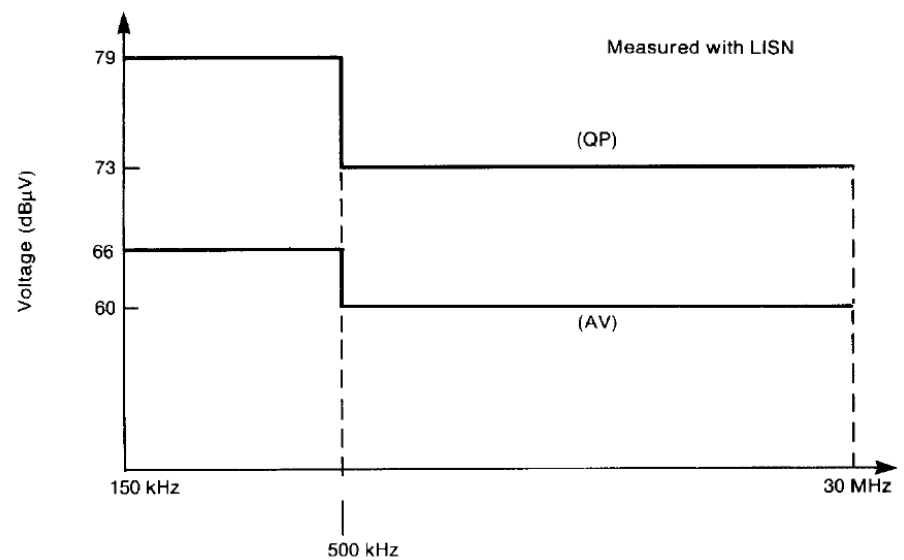
- certifikacija uređaja
 - mjerenje *conducted/radiated* EMI:
 - *conducted EMI* – smetnje koje uređaj odašilje u gradsku mrežu
 - *radiated EMI* – radiofrekvencijske smetnje koje se odašilju u prostor
 - zakonska regulativa i norme propisuju granične dozvoljene vrijednosti električnog i magnetskog polja na određenoj udaljenosti od izvora smetnje (testiranog uređaja) (***radiated EMI***), odnosno vrijednosti napona i struja na LISN (*line impedance stabilization network*) (***conducted EMI***)

Elektromagnetska kompatibilnost

- primjer: granične vrijednosti za *conductive EMI (FCC)*



Class B



Class A

QP – quasi peak, AV - average

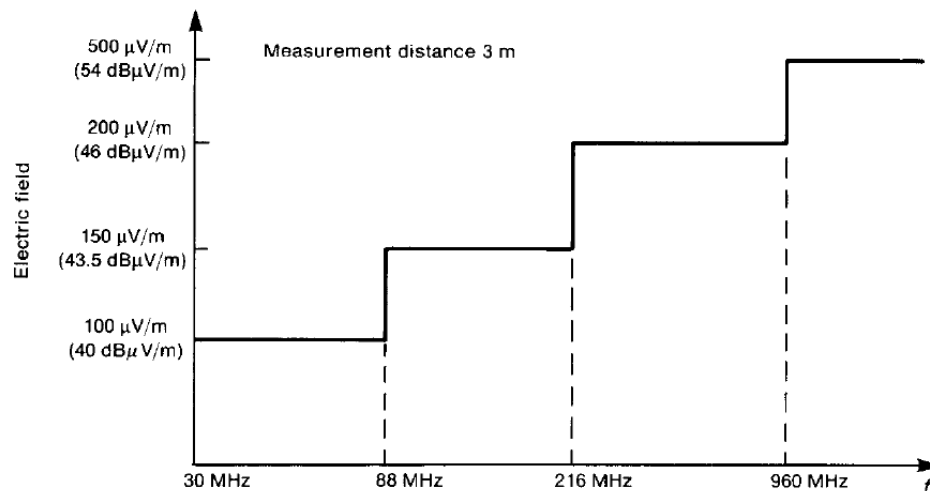
Elektromagnetska kompatibilnost

- područje testiranje *radiated EMI*:

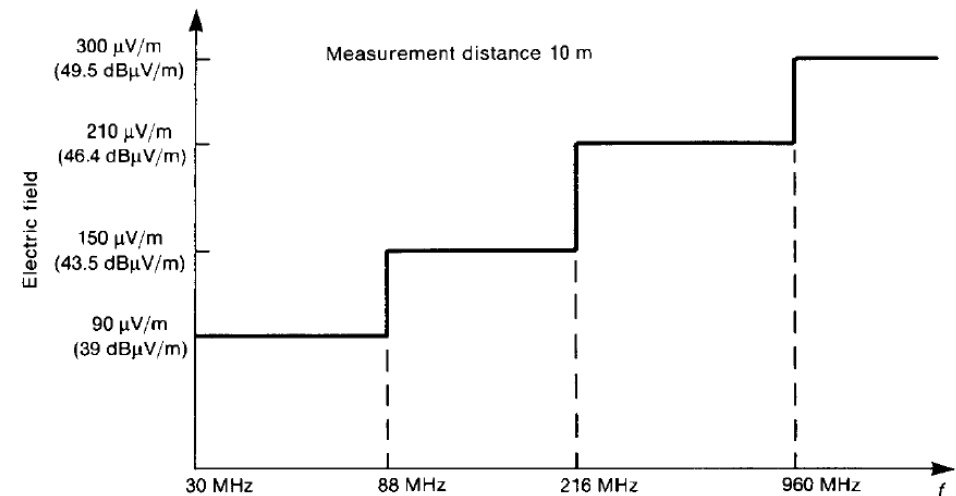
Najviša radna frekvencija uređaja [MHz]	Najviša mjerna frekvencija za EMC testiranje [MHz]
< 1.705	30
1.705 - 108	1000
108 – 500	2000
500 – 1000	5000
> 1000	do frekvencije petog harmonika ili najviše do 40 GHz

Elektromagnetska kompatibilnost

- primjer: granične vrijednosti *električnog polja* za *radiated EMI* (FCC)



Class B



Class A

Elektromagnetska kompatibilnost

FCC Emission Limits for Class A Digital Devices

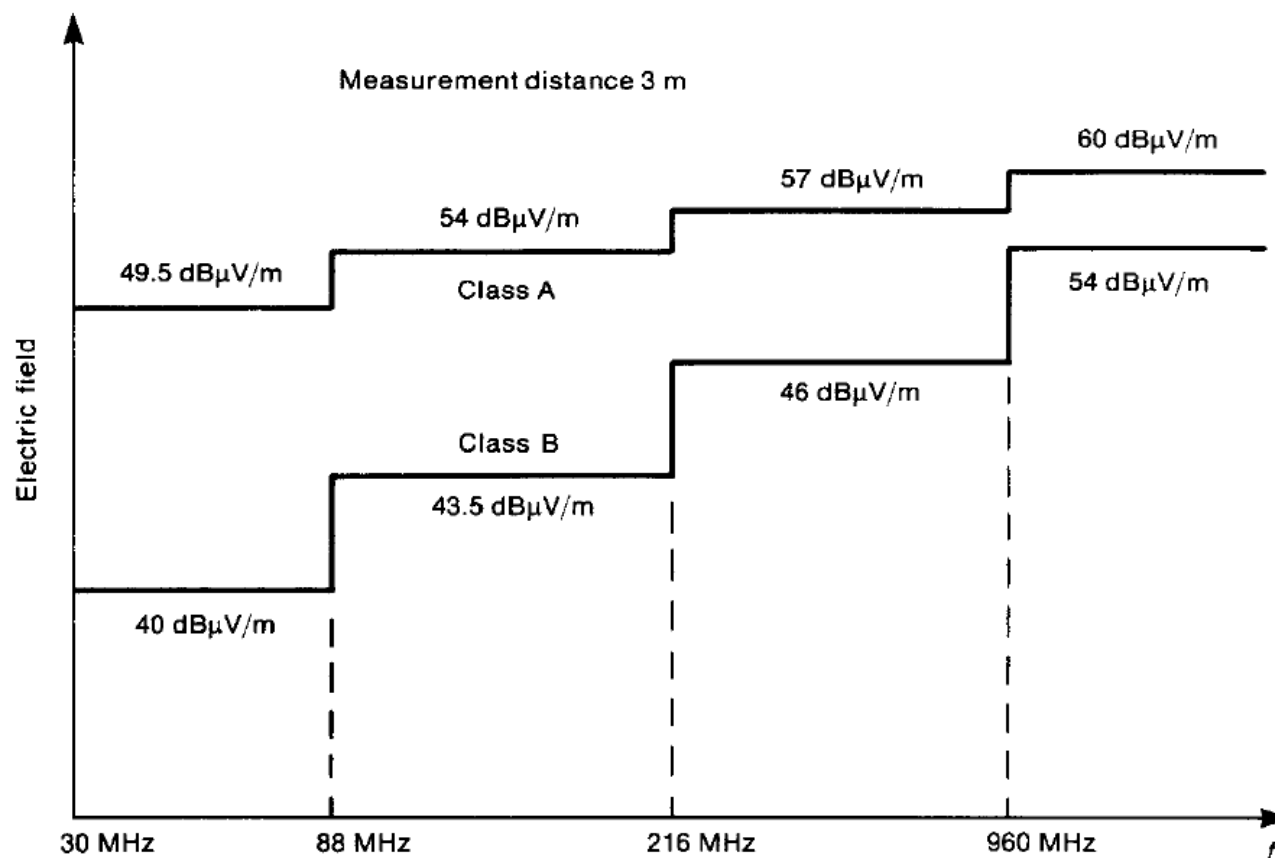
Frequency (MHz)	Measured at 10 m	
	$\mu\text{V}/\text{m}$	$\text{dB}\mu\text{V}/\text{m}$
30–88	90	39
88–216	150	43.5
216–960	210	46.4
>960	300	49.5
> 1 GHz	300 (AV)	49.5 (AV)
	3000 (PK)	69.5 (PK)

FCC Emission Limits for Class B Digital Devices

Frequency (MHz)	Measured at 3 m	
	$\mu\text{V}/\text{m}$	$\text{dB}\mu\text{V}/\text{m}$
30–88	100	40
88–216	150	43.5
216–960	200	46
>960	500	54
> 1 GHz	500 (AV)	54 (AV)
	5000 (PK)	74 (PK)

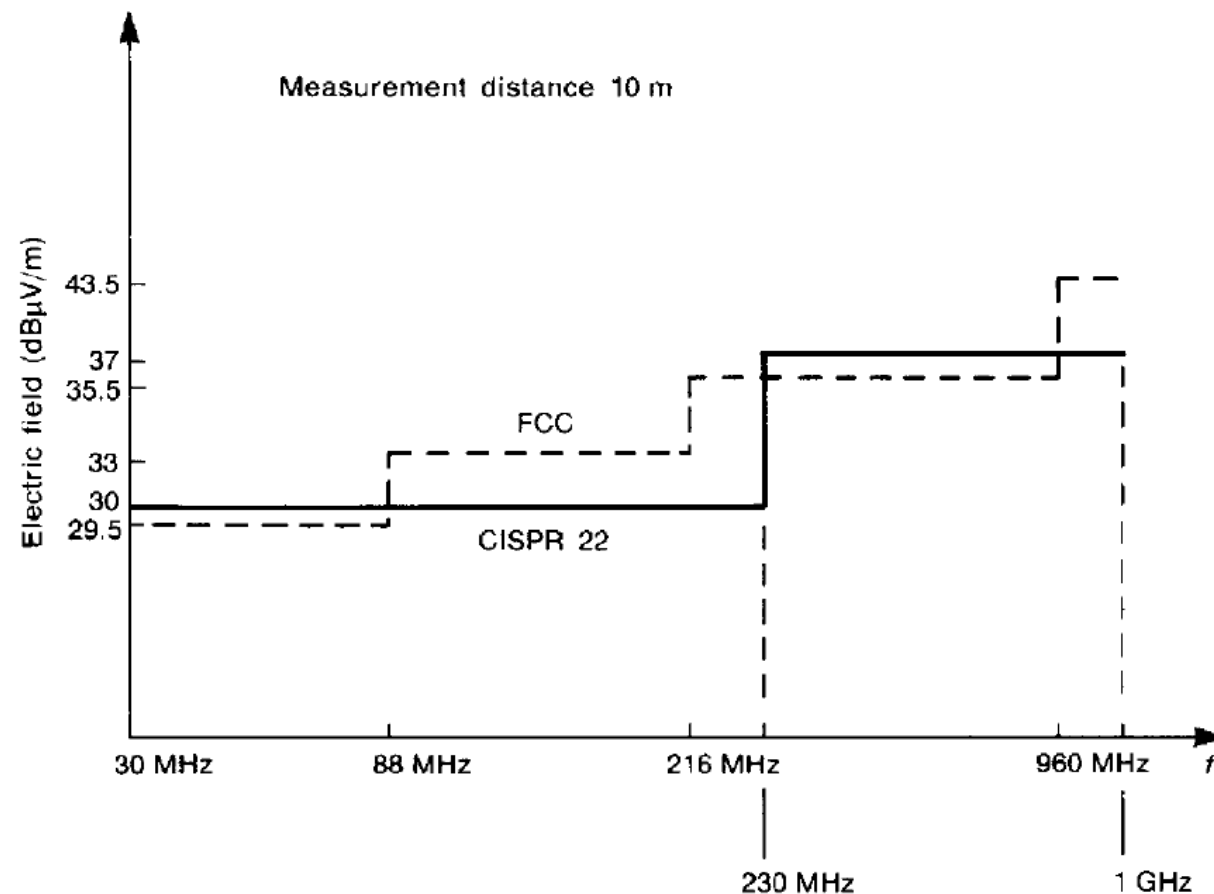
Elektromagnetska kompatibilnost

- primjer: usporedba dozvoljenih emisija A i B klase uređaja (FCC) (na udaljenosti 3 m)



Elektromagnetska kompatibilnost

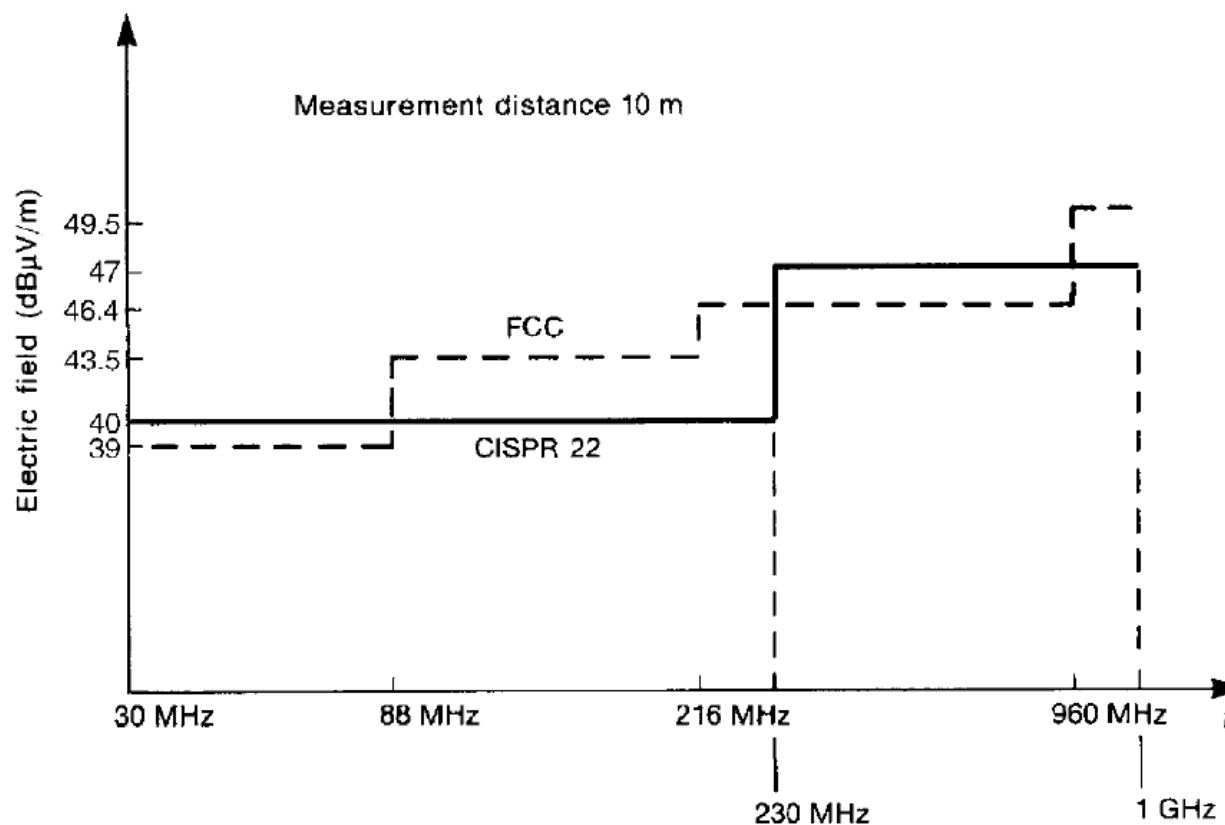
- usporedba FCC/CISPR (klasa B)



Računalom podržano projektiranje elektroničkih uređaja

Elektromagnetska kompatibilnost

- usporedba FCC/CISPR (klasa A)



Elektromagnetska kompatibilnost

- definicija dB:

- napon: $\text{dB} \equiv 20 \log_{10} \frac{U}{U_{REF}}$

- struja: $\text{dB} \equiv 20 \log_{10} \frac{I}{I_{REF}}$

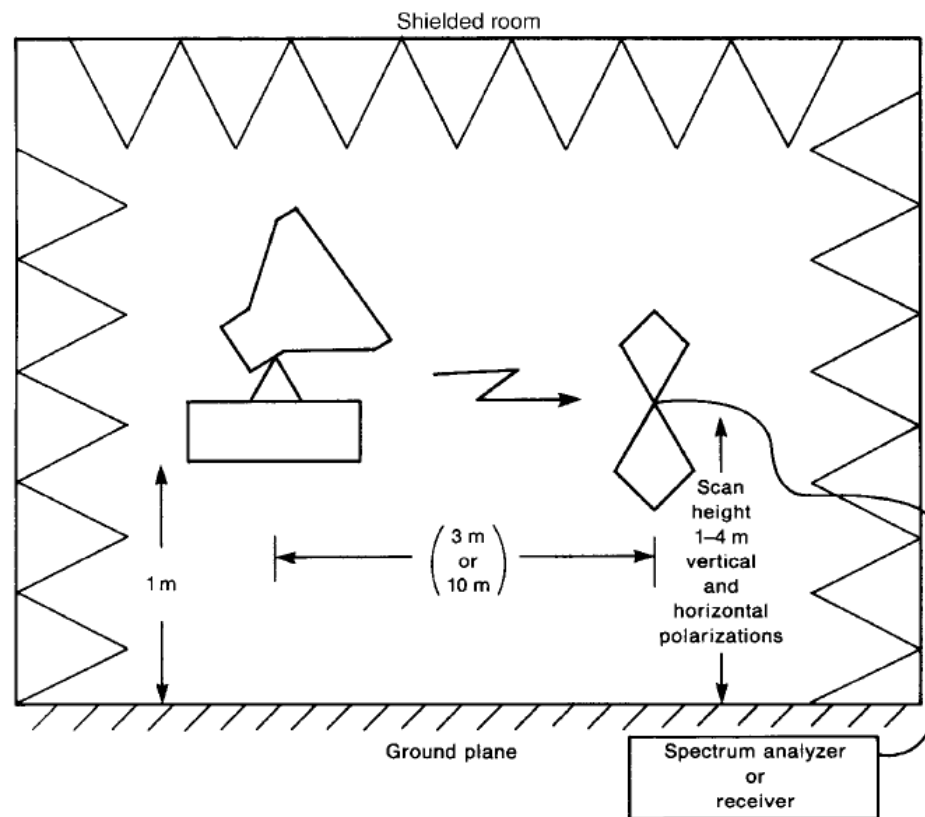
- snaga: $\text{dB} \equiv 10 \log_{10} \frac{P}{P_{REF}}$

- definicija dB μ V:

$$\text{dB} \equiv 20 \log_{10} \frac{U}{1 \mu\text{V}}$$

- referentna razina = 1 μ V (npr. 1 V = 120 dB μ V, 1 mV = 60 dB μ V)

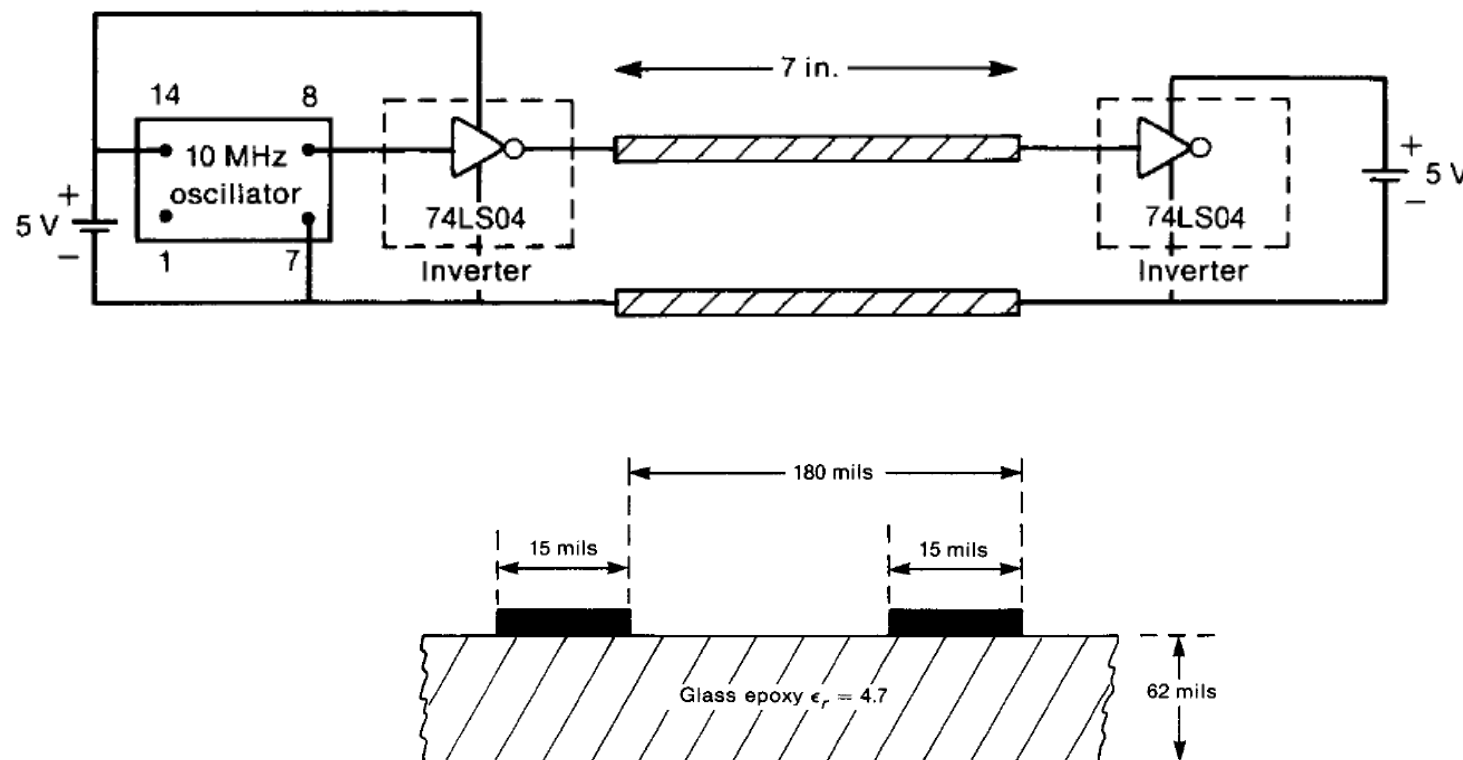
Elektromagnetska kompatibilnost



komora za mjerenje EMI

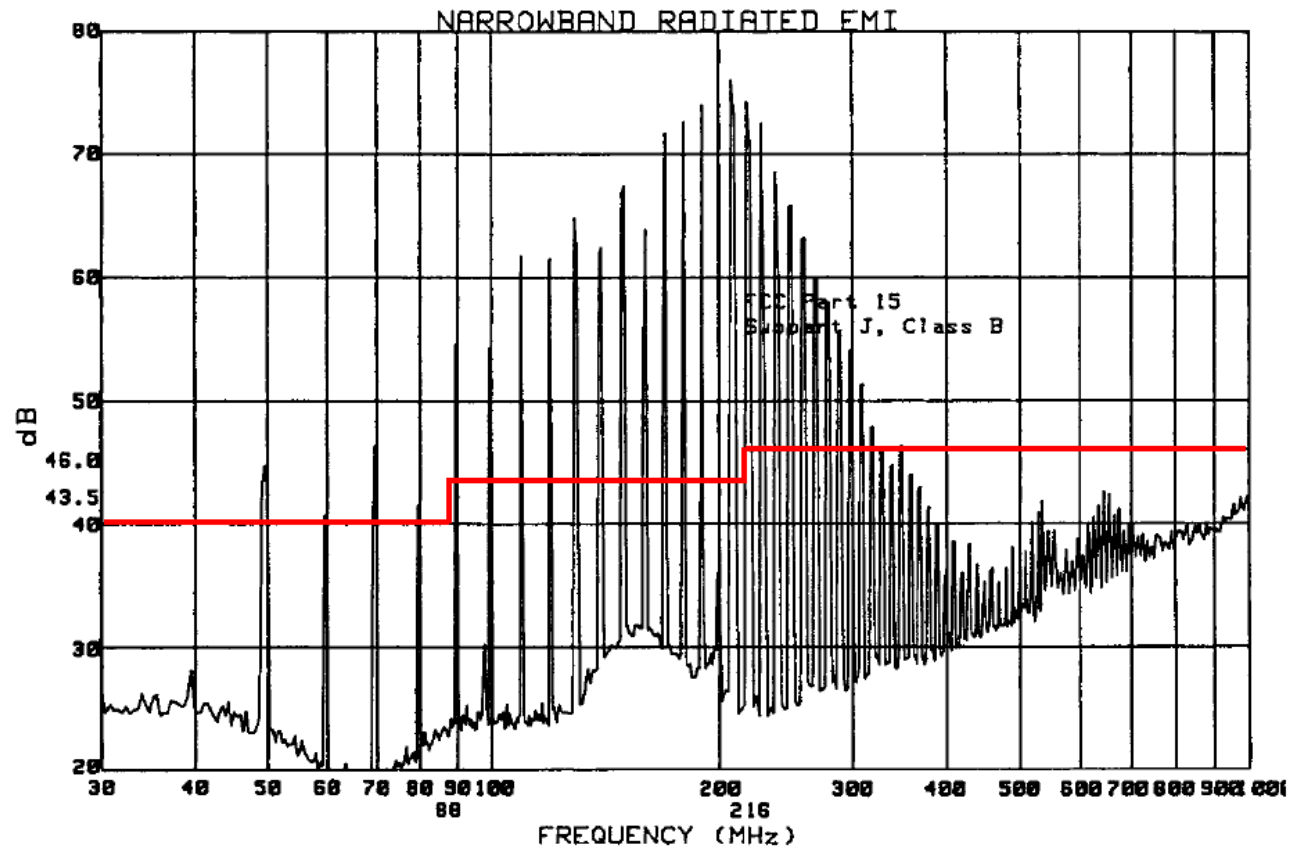
Elektromagnetska kompatibilnost

- primjer:



Elektromagnetska kompatibilnost

- *radiated* EMI test (class B ograničenja, horizontalna komponenta električnog polja)



Elektromagnetska kompatibilnost

- dizajn uređaja sukladnog s EMC normama
 - složena i zahtjevna analiza različitih utjecajnih faktora
 - identifikacija mogućih problema u ranoj fazi razvoja
 - najčešće potreban kompromis između različitih preporuka za dobar EMC dizajn
- potrebno voditi računa o sljedećim bitnim aspektima:
 - generiranje EM smetnji koje mogu utjecati na druge uređaje
 - osjetljivost na EM smetnje iz drugih uređaja
 - analiza smetnji nastalih unutar uređaja na rad samog uređaja (npr. preslušavanje)
- “princip reciprociteta” – uređaj koji je dizajniran tako da minimizira emisiju EMI u pravilu je relativno otporan na utjecaj vanjskih smetnji

Elektromagnetska kompatibilnost

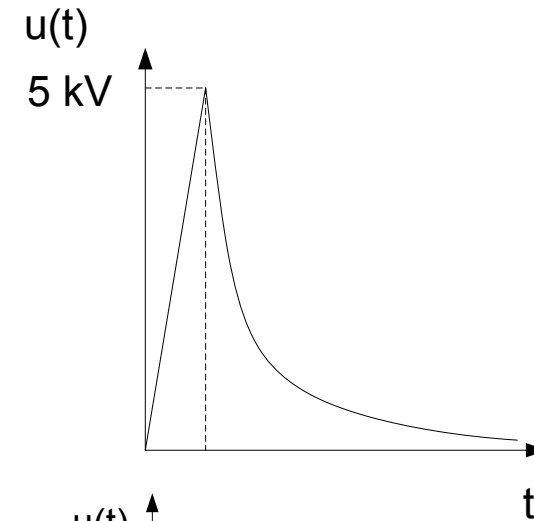
- *conductive* EMI:
 - smetnje zajedničke impedancije mase ili napajanja na tiskanoj pločici:
 - problem ispravnog rada uređaja, ali ne i zakonske regulative
 - smetnje u RF području koje uređaj **šalje** u gradsku mrežu ili **prima** iz nje:
 - dugački vodovi gradske mreže predstavljaju antene koje dobro zrače smetnje u prostor – posljedica: *radiated* EMI!
 - uređaj mora zadovoljiti ograničenja propisana normama
 - također postoji i problem smetnji koje u uređaj mogu doći iz gradske mreže (udar groma, isključenje velikog induktivnog trošila, drugi uređaji i sl.)
 - uređaj mora biti otporan na smetnje koje dolaze iz mreže napajanja

Elektromagnetska kompatibilnost

- *conductive* EMI:

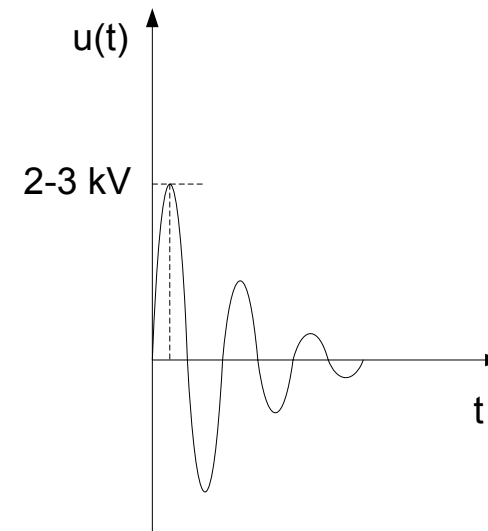
- udar groma:

- istofazne smetnje



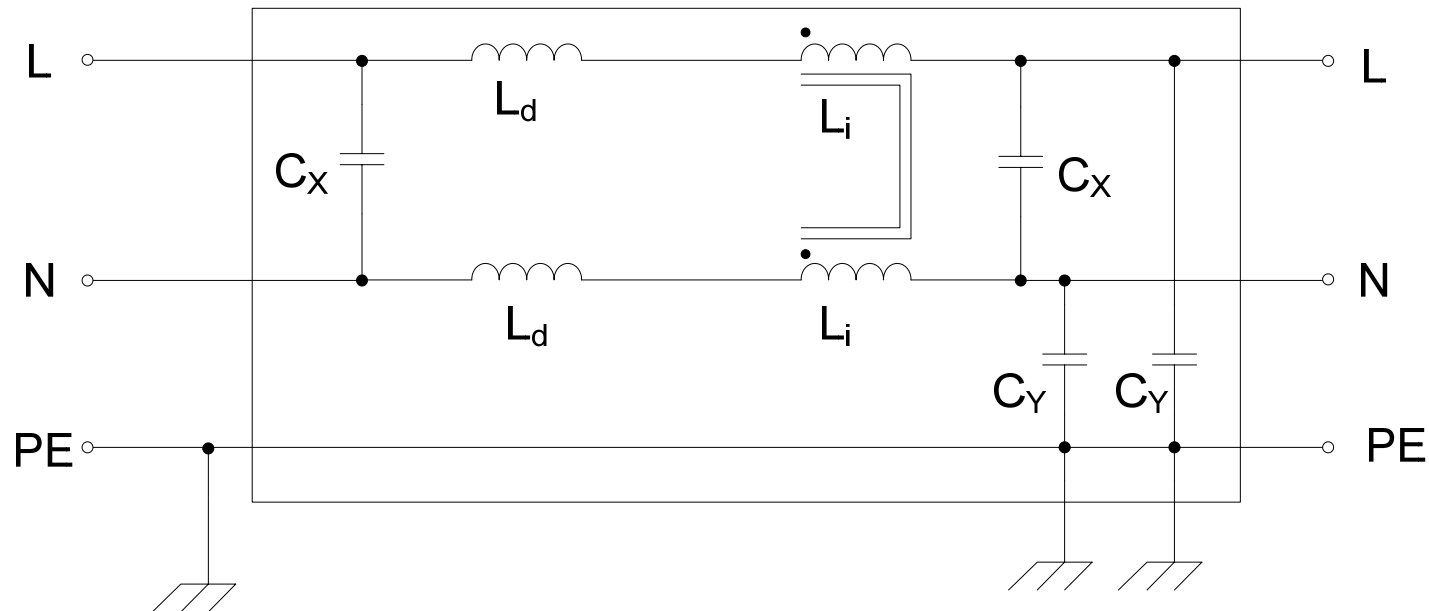
- isključenje velikog induktivnog trošila:

- diferencijalne smetnje



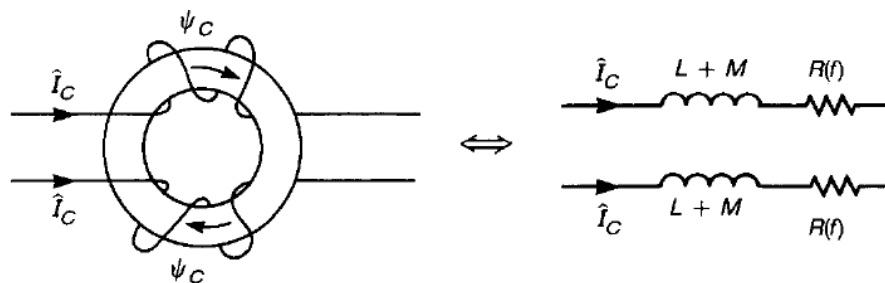
Elektromagnetska kompatibilnost

- mreža za zaštitu od smetnji u RF području (*conductive EMI*):

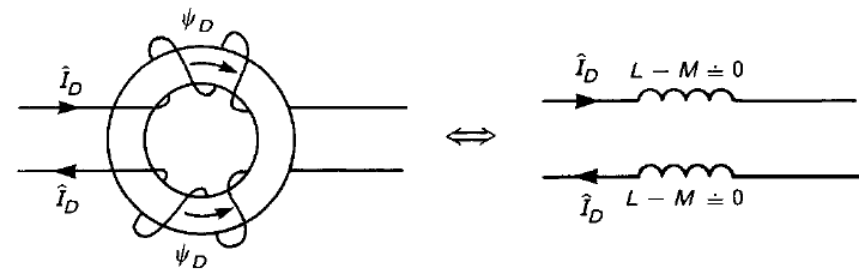


Elektromagnetska kompatibilnost

- C_X, C_Y – kondenzatori posebne namjene
 - C_Y ne smije biti prevelik zbog kapacitivnih struja koje teku u vod zaštitnog uzemljenja (PE) (max. do 0,5 mA)
- L_d – zavojnice za zaštitu od diferencijalnih smetnji
- L_i – zavojnice za zaštitu od istofaznih smetnji (*common-mode chokes*)
 - motane *bifilarno* na istoj jezgri



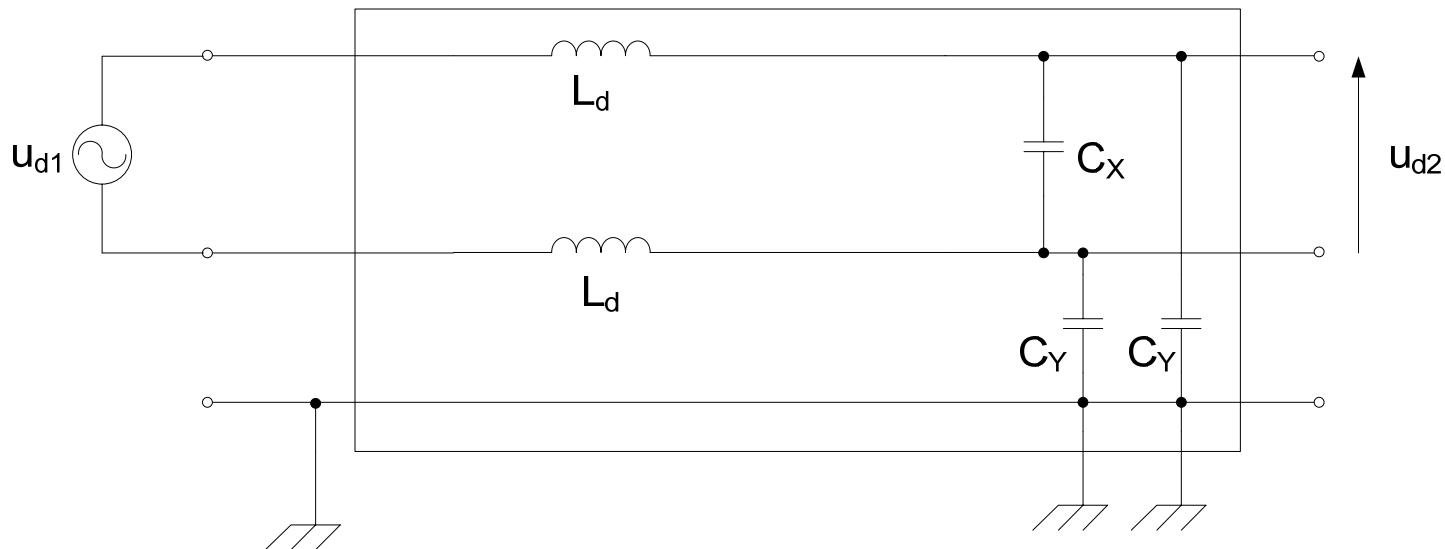
istofazne smetnje



diferencijalne smetnje

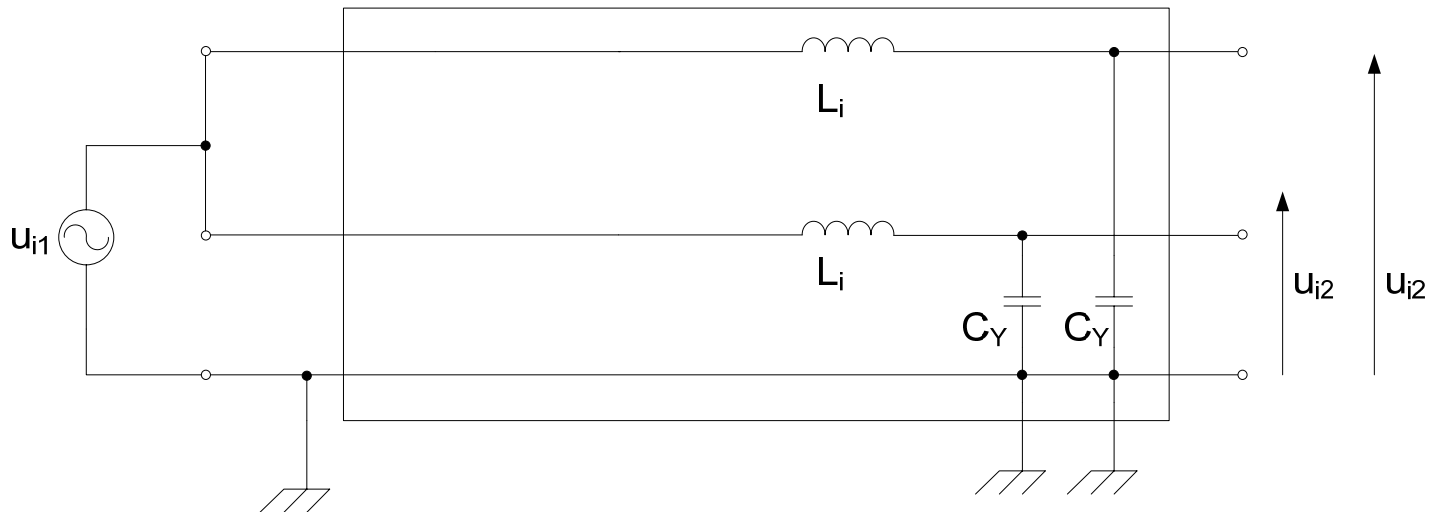
Elektromagnetska kompatibilnost

- nadomjesna shema (gušenje diferencijalnih smetnji nastalih u mreži):



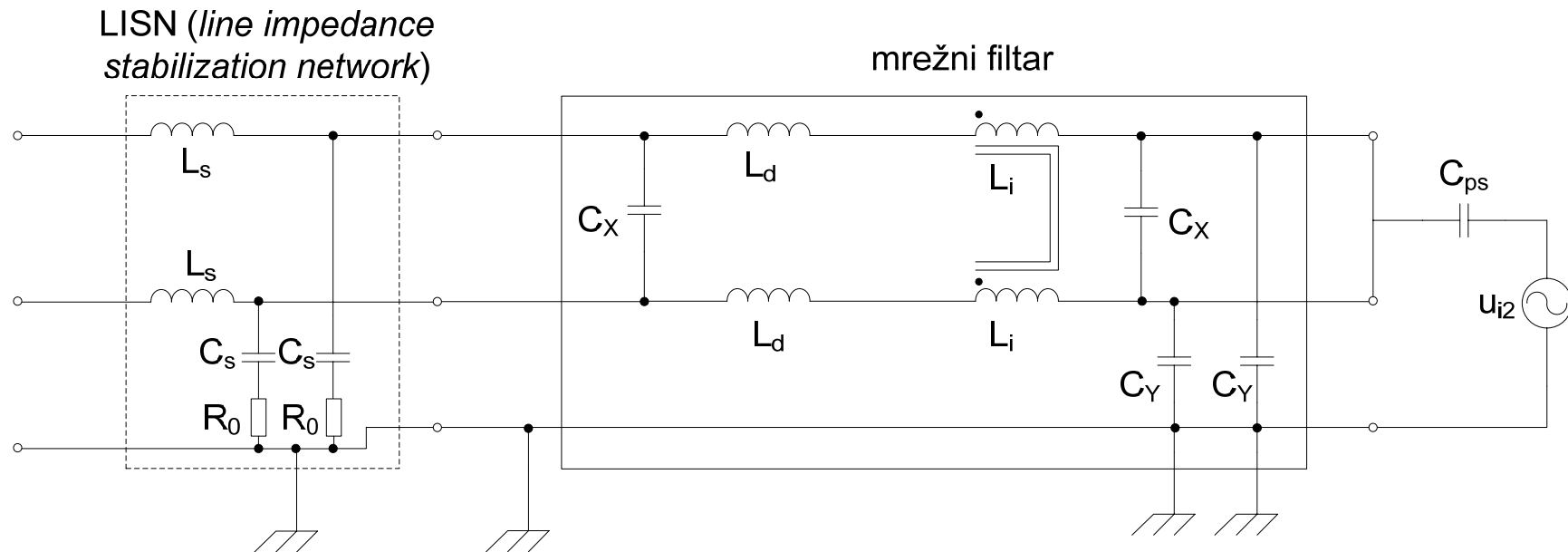
Elektromagnetska kompatibilnost

- nadomjesna shema (gušenje istofaznih smetnji nastalih u mreži):



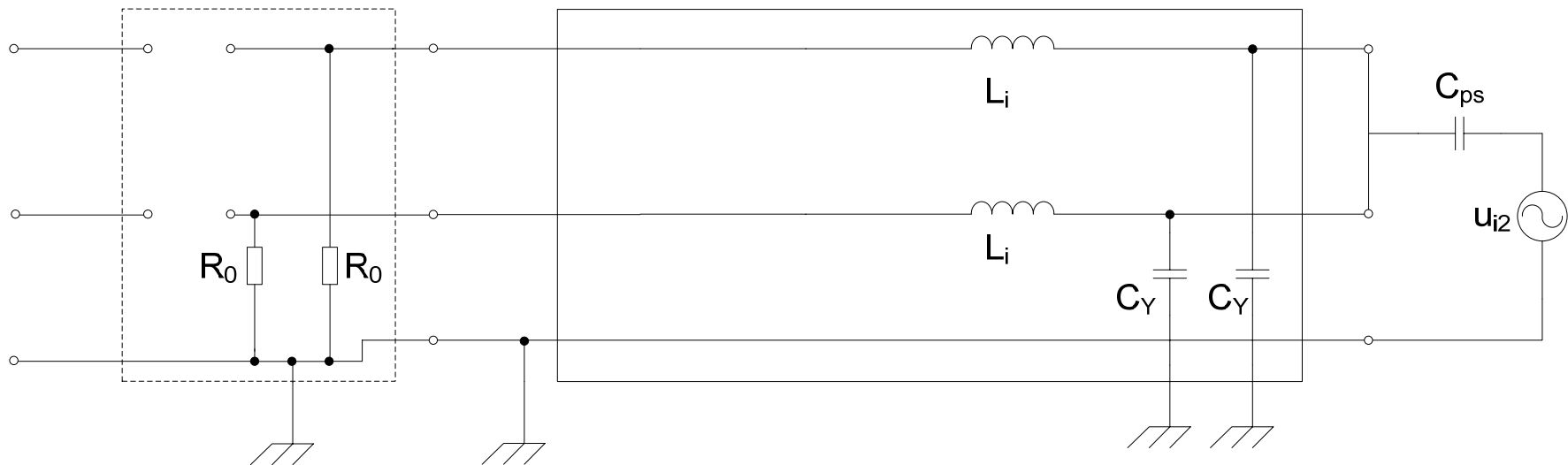
Elektromagnetska kompatibilnost

- mjerjenje istofaznih smetnji nastalih u uređaju:



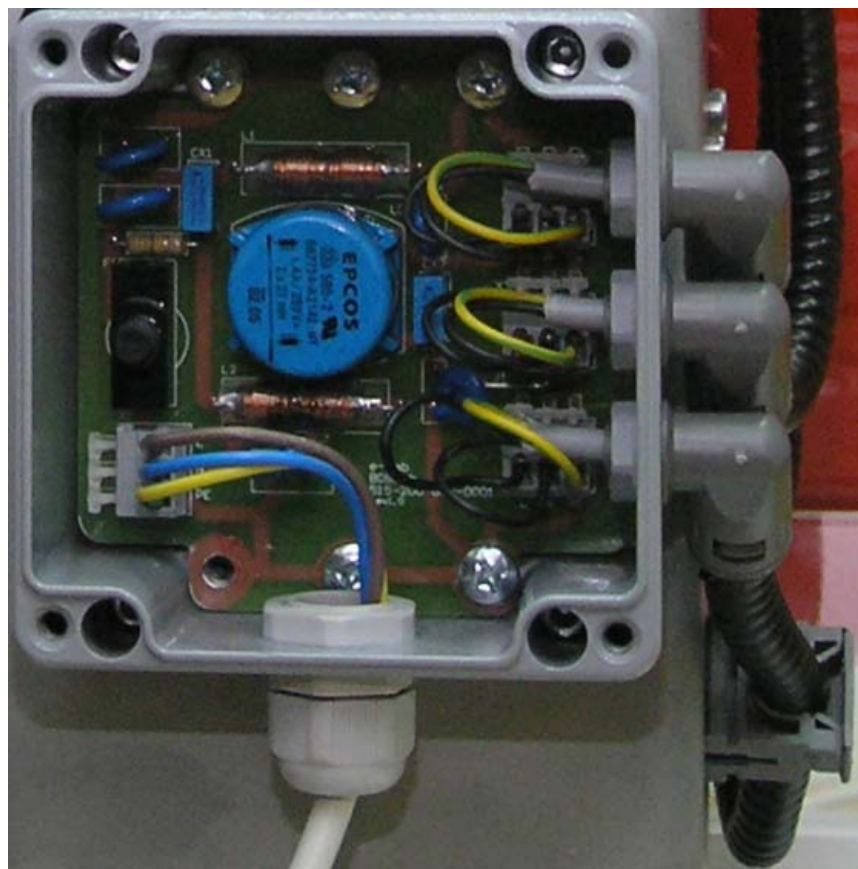
Elektromagnetska kompatibilnost

- nadomjesna shema (gušenje istofaznih smetnji nastalih u uređaju):



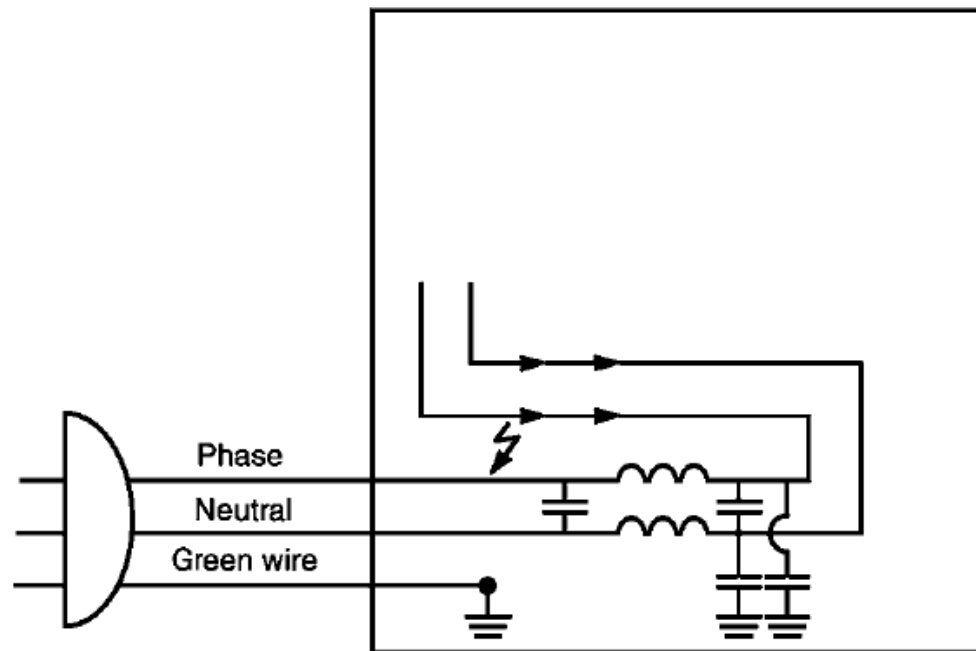
Elektromagnetska kompatibilnost

- primjer izgleda mrežnog filtra:



Elektromagnetska kompatibilnost

- primjer: nepovoljan smještaj linija napajanja u uređaju iza mrežnog filtra za prigušenje smetnji u RF području

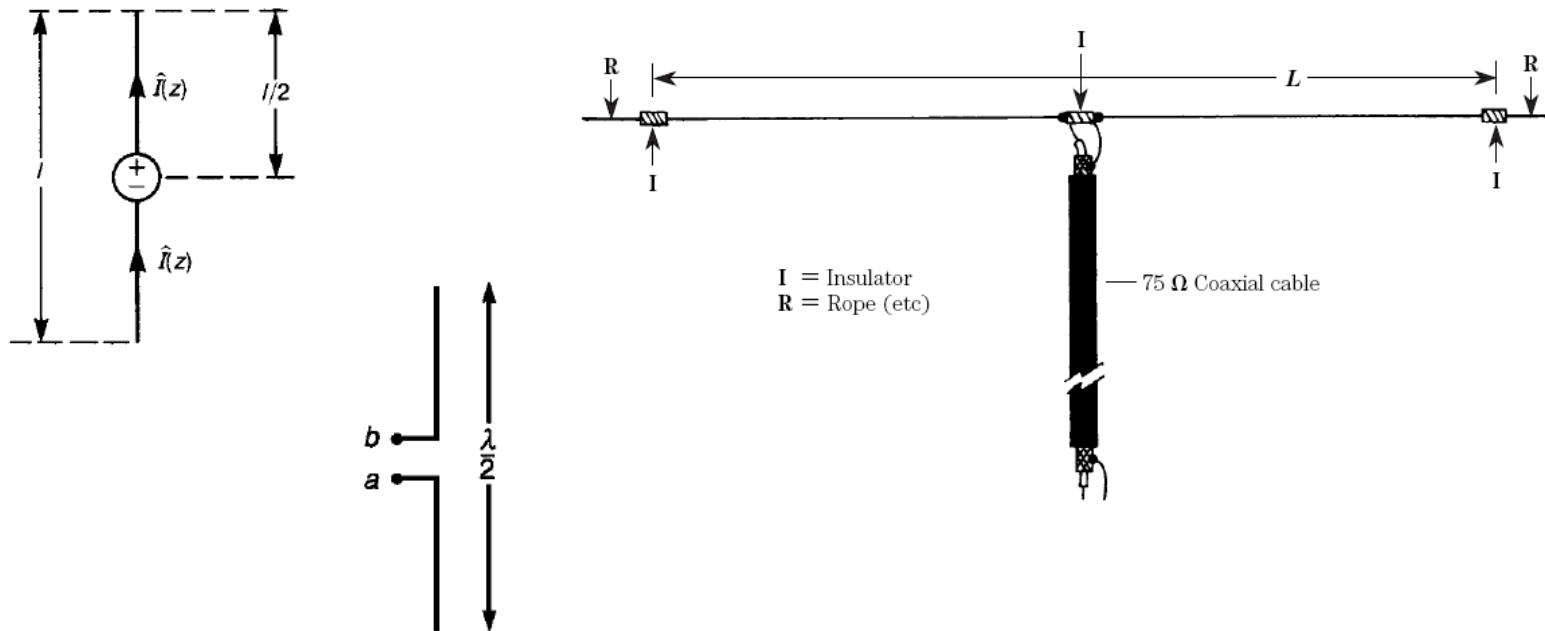


Elektromagnetska kompatibilnost

- *radiated* EMI
 - smetnje električnog i magnetskog polja (NF)
 - elektromagnetski valovi (VF)
- metode djelovanja na smanjenje odašiljanja i prijema smetnji:
 - oklapanje (metalno kućište)
 - dizajn tiskane pločice
 - način razvođenja i oklapanje kabela

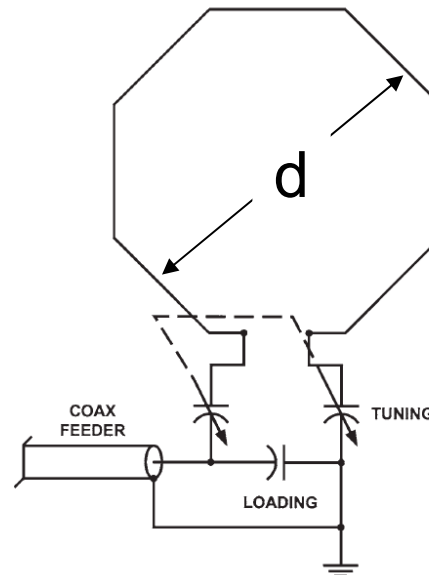
Elektromagnetska kompatibilnost

- zračenje elektromagnetskih valova
 - *half-wave dipole* antenna (duljina antene $\lambda/2$)



Elektromagnetska kompatibilnost

- zračenje elektromagnetskih valova
 - *loop* antena ($d > \lambda/20$)



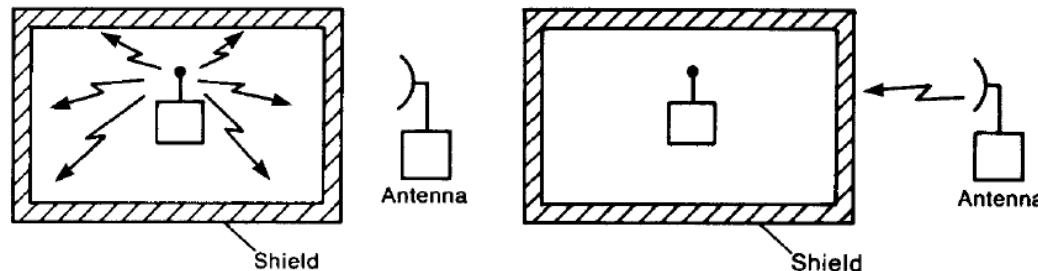
- oprez: VF strujne petlje na tiskanoj pločici mogu se ponašati kao *loop* antene!

Elektromagnetska kompatibilnost

- zaštita od *radiated* EMI - oklapanje uređaja (metalno kućište):
 - dobra zaštita od NF smetnji električnog polja
 - slaba zaštita od NF smetnji magnetskog polja (osim ako se ne koriste posebni materijali, npr. mumetal)
 - dobra zaštita od prodora i odašiljanja RF valova s tiskane pločice
 - da bi se postigla zaštita u RF području, metalno kućište mora biti **u potpunosti** zatvoreno!

Elektromagnetska kompatibilnost

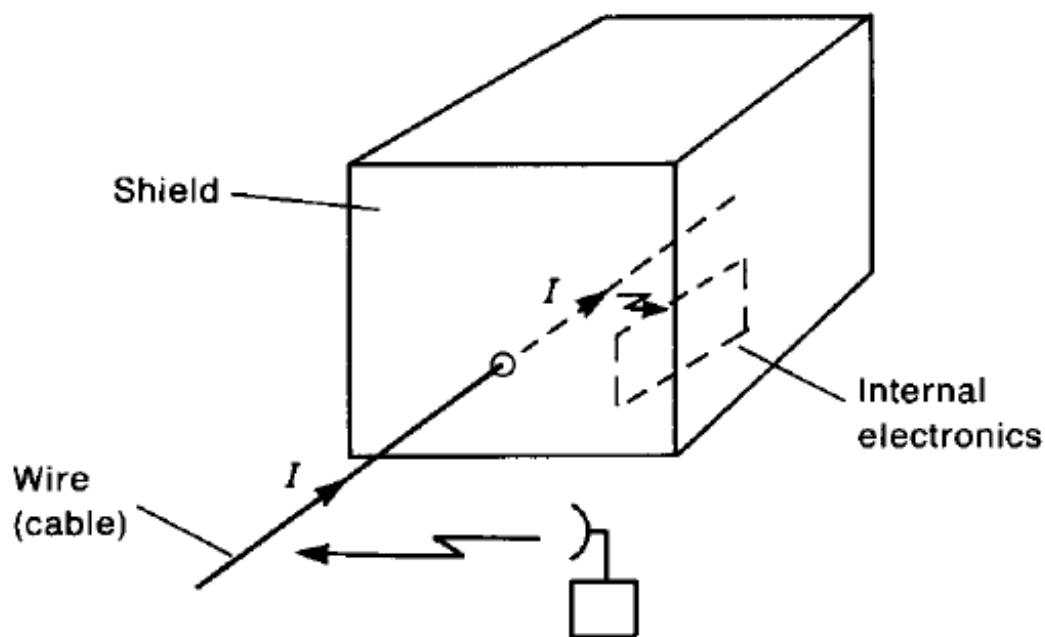
- oklapanje uređaja - metalno kućište:



- problemi:
 - najčešće nije moguće koristiti metalno kućište (npr. proizvodi u plastičnom kućištu – moguće nanošenje vodljivog sloja na unutrašnju stjenku plastičnog kućišta)
 - u pravilu nužno postojanje malenih otvora, koji se ponašaju kao antene!
 - kabli koji izlaze iz oklopljenog uređaja također se ponašaju kao antene

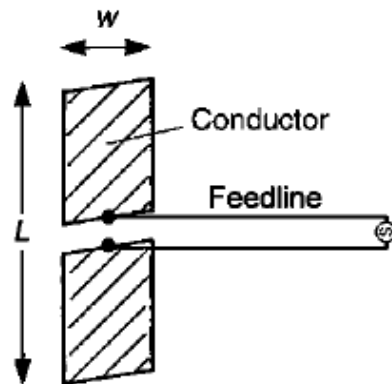
Elektromagnetska kompatibilnost

- prodor RF signala preko kabela može u potpunosti poništiti efekt dobrog oklapanja:

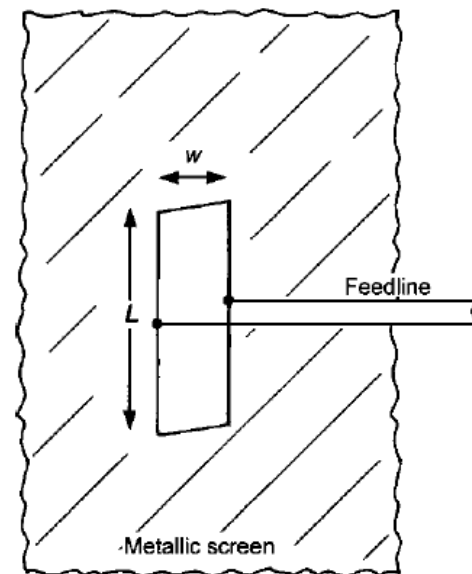


Elektromagnetska kompatibilnost

- utjecaj otvora na metalnom kućištu na RF zračenje:
 - otvori (*slots*) u savršeno vodljivoj površini ponašaju se kao antene s komplementarnom strukturom



dipole antena



“*slot*” antena

Elektromagnetska kompatibilnost

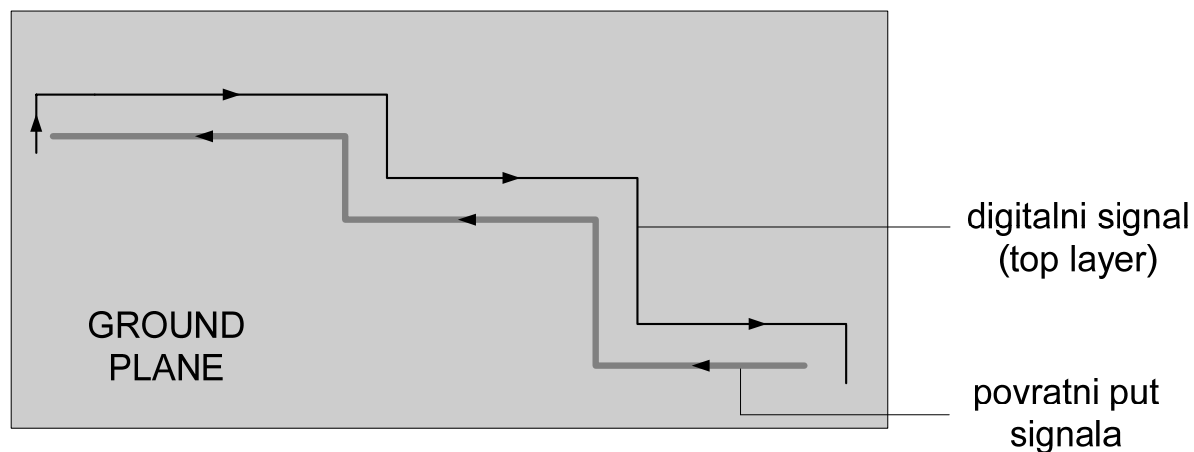
- utjecaj otvora na metalnom kućištu na RF zračenje:
 - ako se na metalnom kućištu nalazi vrlo uski otvor duljine $\lambda/2$, tada se on ponaša kao *half-wave dipole antena*
 - s gledišta EMC i RF emisije, na metalnom kućištu uređaja bolje je koristiti više malenih okruglih rupa, nego jednu usku i dugačku
- utjecaj kabela
 - oklapanje i povezivanje s metalnim oklopom
 - filtriranje (feritne perle ili posebni RFI *suppresion* filtri)

Elektromagnetska kompatibilnost

- dizajn tiskane pločice
 - s rješavanjem EMC problema bitno je započeti već na samoj tiskanoj pločici
 - prvenstveno treba voditi računa o načinu zatvaranja VF strujnih petlji na tiskanoj pločici:
 - ključno je minimizirati **površinu** strujnih petlji (tj. površinu ekvivalentne *loop* antene)
 - koristiti *power* i *ground plane*ove (niskoimpedantni povratni put struje i dobro poništavanje EM polja)
 - prilagođenje impedancije – minimizacija zračenja RF energije u prostor

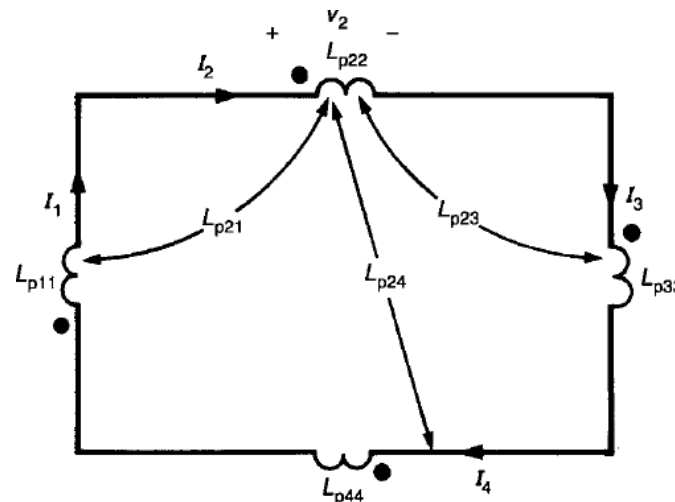
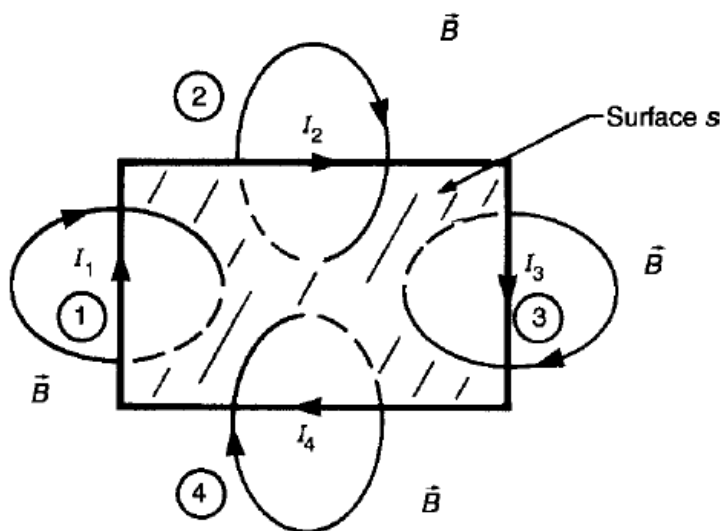
Elektromagnetska kompatibilnost

- odabir broja slojeva:
 - jednoslojne i dvoslojne tiskane pločice – slaba EMC svojstva zbog neoptimalnog povratnog puta RF struje
 - preporučljivo je koristiti višeslojne tiskane pločice s posebnim *power* i *ground planeovima*
 - u idealnom slučaju, povratni put struje je zrcaljena slika signala – najbolje poništavanje EM polja



Elektromagnetska kompatibilnost

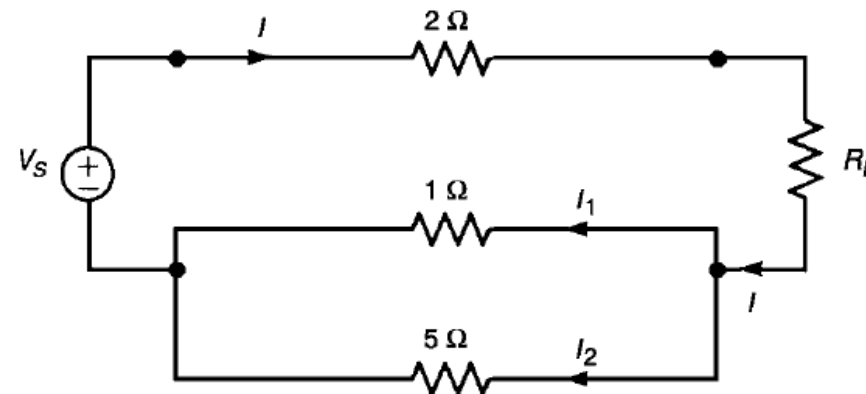
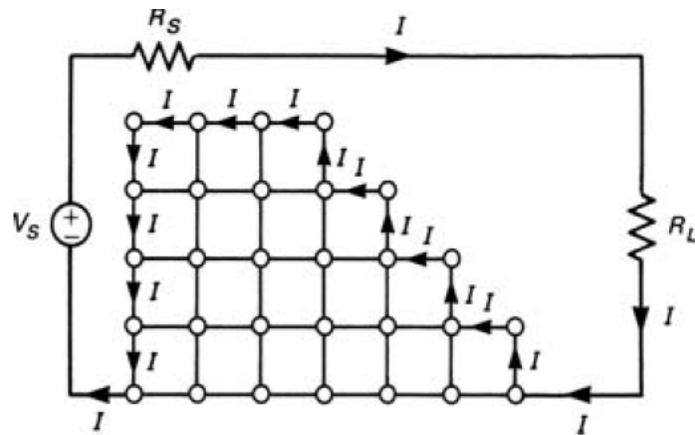
- induktivitet strujnih petlji na tiskanoj pločici:



- induktivitet raste s površinom strujne petlje

Elektromagnetska kompatibilnost

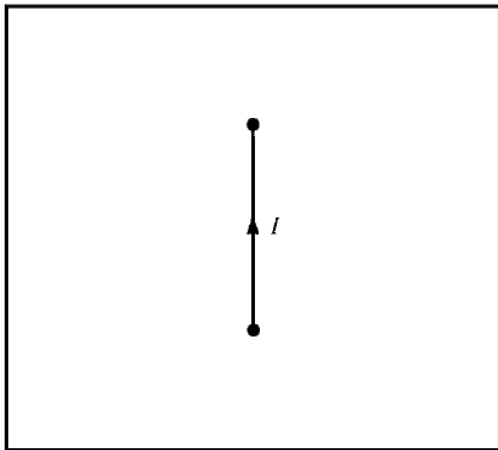
- primjer: tiskana pločica s mrežastim *ground planeom*



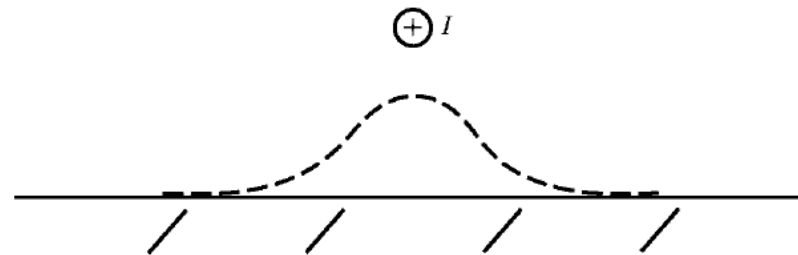
- povratna struja će se zatvoriti putem najmanje impedancije, što je u prikazanom slučaju put koji obuhvaća najmanju površinu struje petlje (minimalni induktivitet, jer je parazitni otpor vodova približno jednak za sve mogućnosti, a i manje utječe na VF od induktiviteta)

Elektromagnetska kompatibilnost

- raspodjela povratne struje u *ground planeu* ispod signalnog voda:



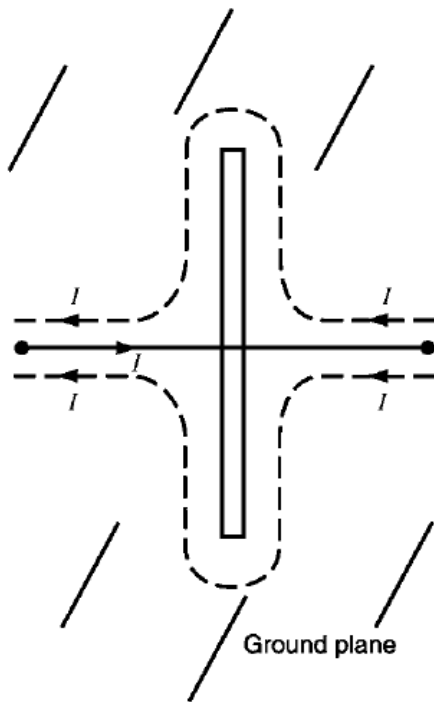
vod iznad
ground planea



raspodjela struje u
ground planeu

Elektromagnetska kompatibilnost

- prekidi u homogenom *ground planeu* (*slots*)



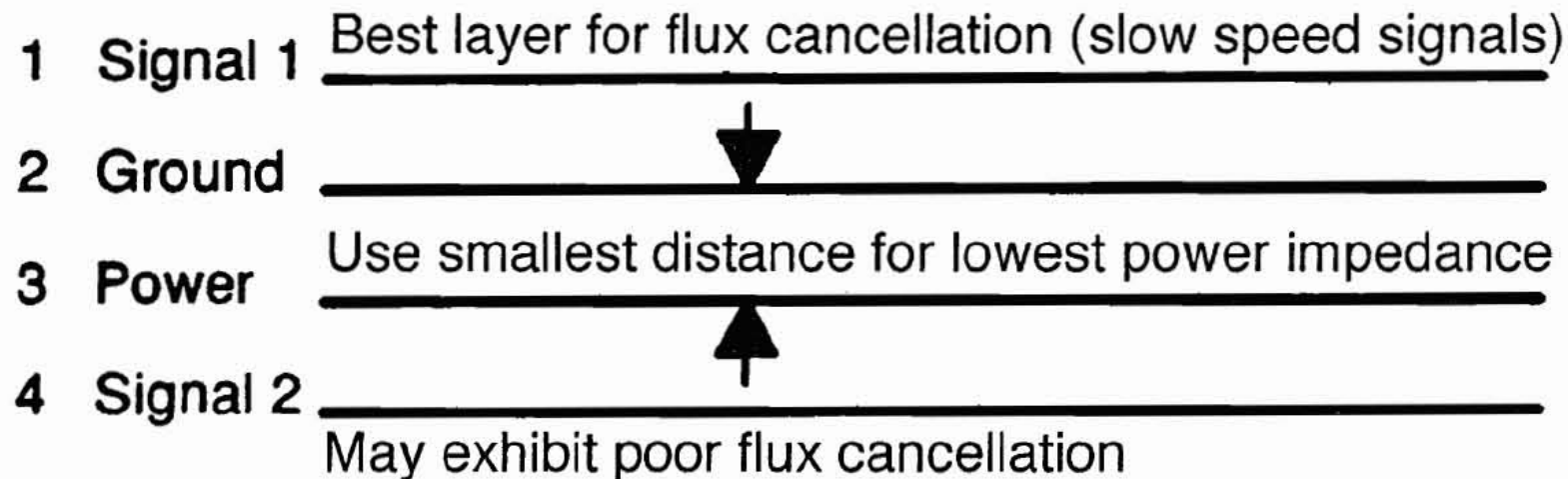
- zbog postojanja prepreke u *ground planeu*, put minimalne impedancije povratne struje zatvara strujnu petlju razmjerno velike površine
- *loop antenna* – efikasno zračenje RF smetnji ako su dimenzije petlje $\geq \lambda/20$

Elektromagnetska kompatibilnost

- višeslojne pločice:
 - *power* i *ground plane* ovi omogućavaju zatvaranje povratnih RF struja optimalnim (niskoimpedancijskim) putem
 - smanjuju karakterističnu impedanciju izvora napajanja (povećanjem raspodijeljenog kapaciteta između mase i napajanja)
 - omogućavaju realizaciju tiskanih vodova s kontroliranom impedancijom (*microstrip*, *stripline*)
 - neprilagođene linije na kojima se javljaju refleksije također su izvor RF smetnji!
 - RF signali koji se kreću kroz prilagođenu prijenosnu liniju ne zrače energiju u prostor
 - pravilo: kritične signale voditi uz *ground plane*, ne uz *power plane*! (*power plane* pokazuje lošija svojstva poništavanja EM polja)

Elektromagnetska kompatibilnost

- *layer stack-up* – četveroslojna pločica



- bolji EMC rezultati od dvoslojnih pločica

Elektromagnetska kompatibilnost

- *layer stack-up* – šesteroslojna pločica

1	Signal 1	Excellent routing layer (X)	
2	Ground	Good flux cancellation	X-Y paired traces
3	Signal 2	Excellent routing layer (Y)	
Fill material			
4	Power		
5	Ground	Lower power impedance	
6	Signal 3	Good flux cancellation	

- mogući i drugačiji rasporedi slojeva, ali je prikazani najbolji s gledišta EMC

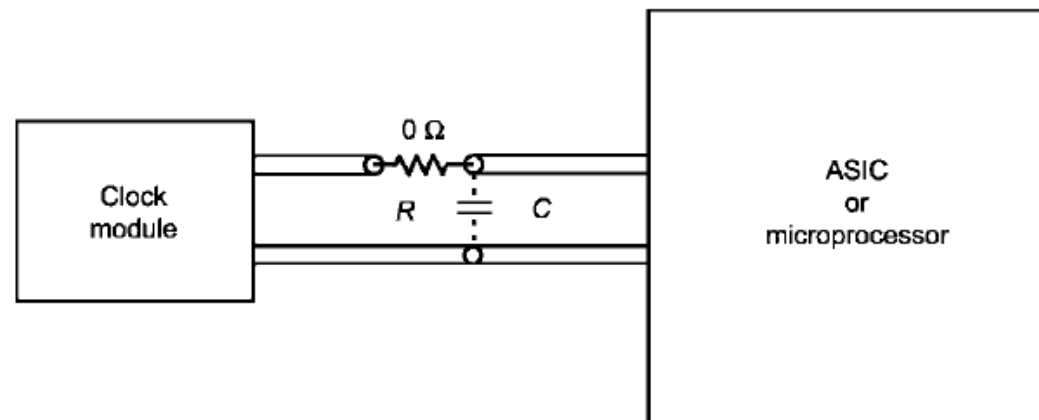
Elektromagnetska kompatibilnost

- preporučeni *layer stack-up* za 8-slojnu pločicu

1	Signal 1	<u>Excellent routing layer (X)</u>
2	Ground	<u>X-Y paired traces</u>
3	Signal 2	<u>Excellent routing layer (Y)</u>
	Fill 1	
4	Ground	
5	Power	<u>Excellent flux cancellation between power and ground planes</u>
	Fill 2	
6	Signal 3	<u>Excellent routing layer (X)</u>
7	Ground	<u>X-Y paired traces</u>
8	Signal 4	<u>Excellent routing layer (Y)</u>

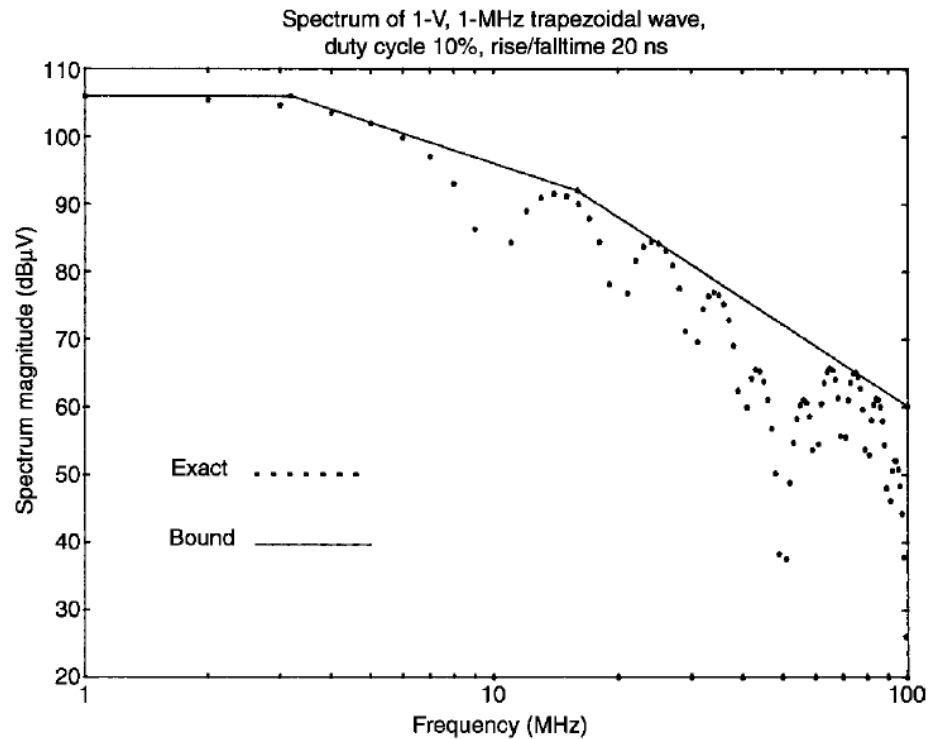
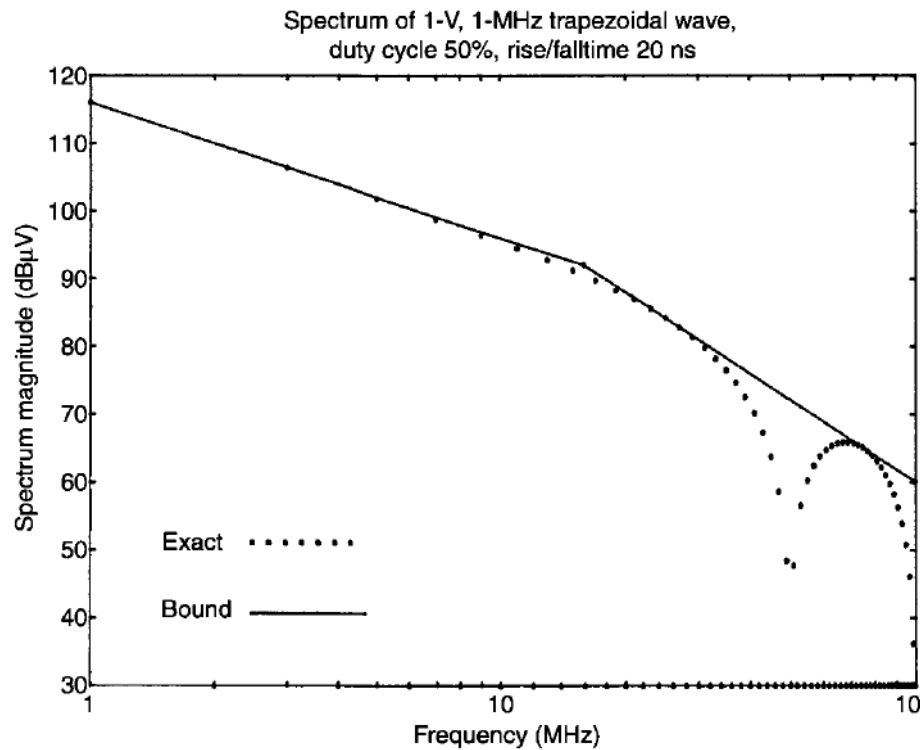
Elektromagnetska kompatibilnost

- za emisiju EMI kod brzih digitalnih sklopova važnija su vremena porasta i pada signala od same radne frekvencije!
- pravilo: uvijek odabrati **najsporiju** logičku porodicu koja zadovoljava potrebe dizajna ($BW \approx 1/t_r$ (npr. $t_r=0.5 \text{ ns} \Rightarrow BW \approx 2 \text{ GHz!}$))
- kod izrade prototipa dobro je predvidjeti mjesta za dodavanje pasivnih komponenti koje mogu pomoći u rješavanju EMC problema
- primjer: usporeenje t_r/t_f na brznoj digitalnoj liniji:



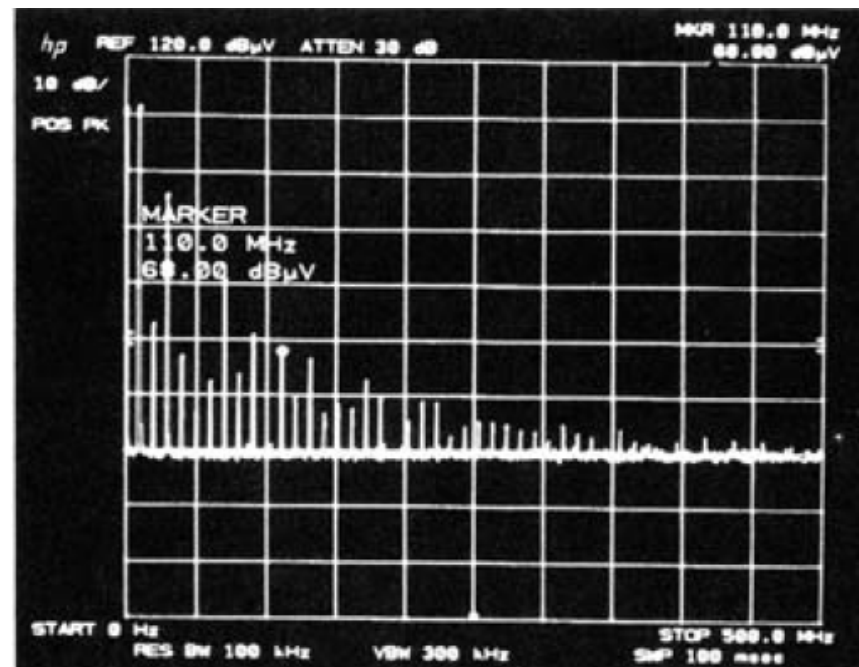
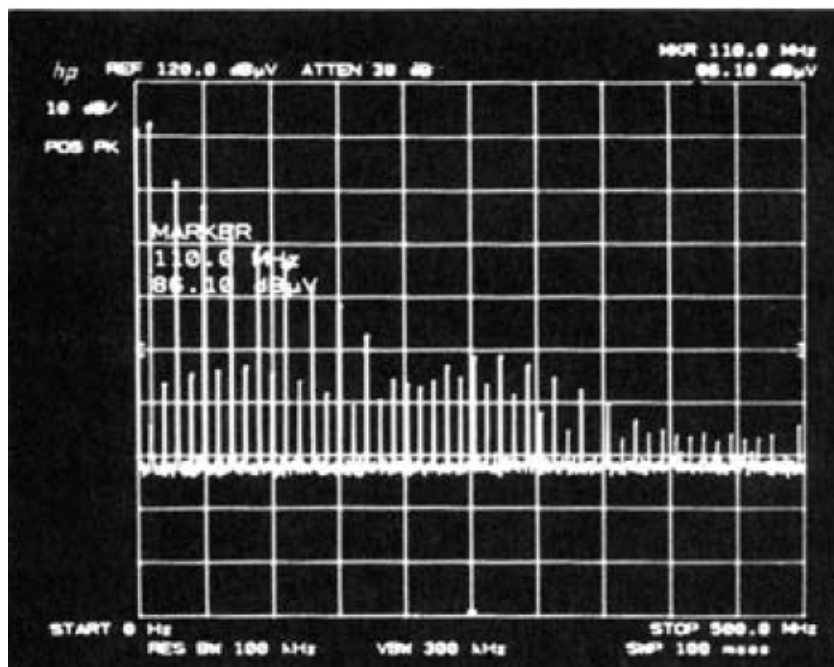
Elektromagnetska kompatibilnost

- usporedba spektara digitalnih signala 1 MHz, $t_r, t_f = 20$ ns, uz radne omjere 50% i 10%



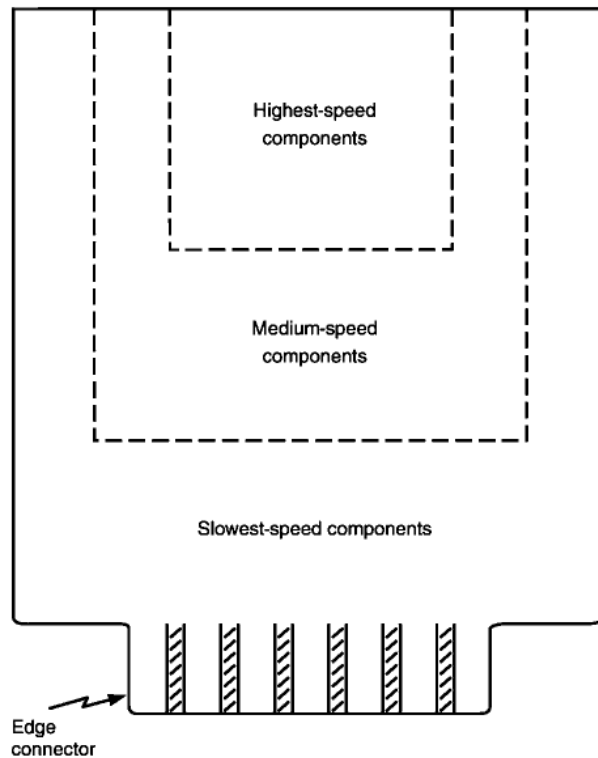
Elektromagnetska kompatibilnost

- usporedba spektara digitalnih signala 10 MHz i radni omjer $\delta = 50\%$, uz t_r, t_f 5 i 20 ns



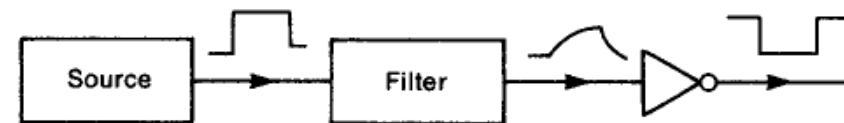
Elektromagnetska kompatibilnost

- raspoređivanje komponenti na tiskanoj pločici



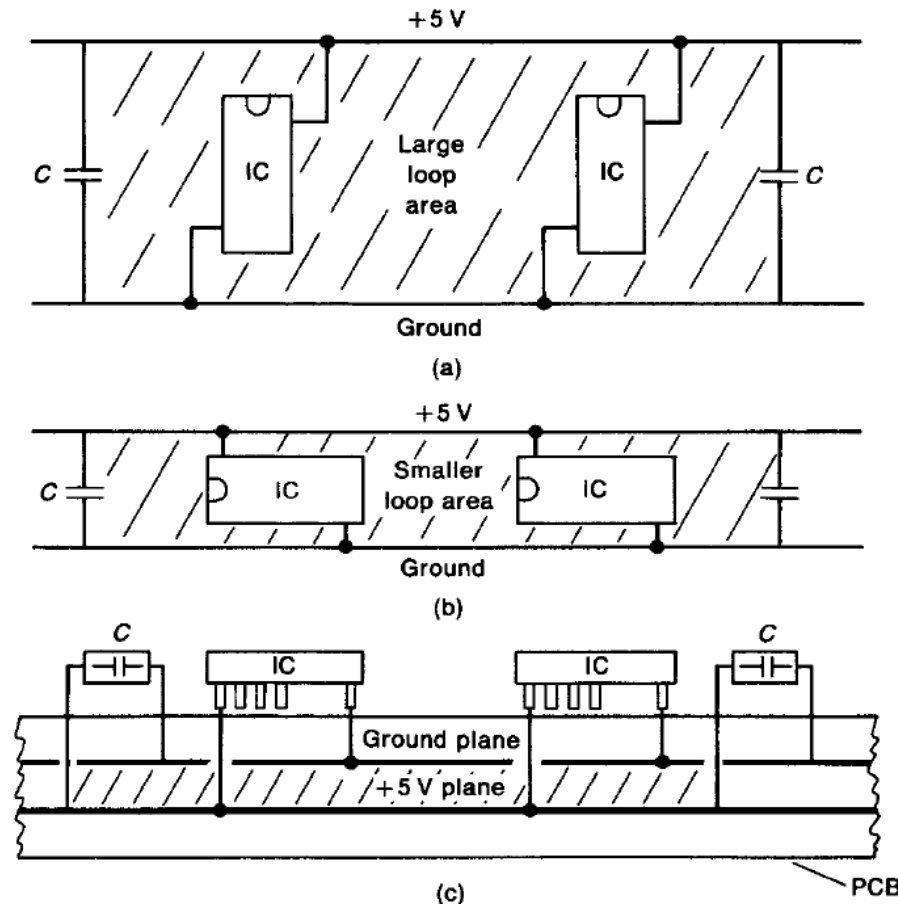
- parazitni kapacitet izvoda komponenti usporava t_r/t_f signala

- pri tome je potreban oprez:



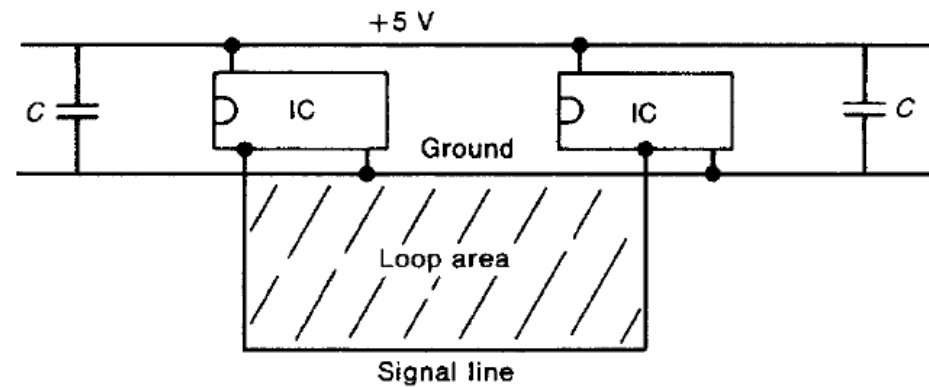
Elektromagnetska kompatibilnost

- minimizacija površina strujnih petlji – smanjenje emisije RF EMI

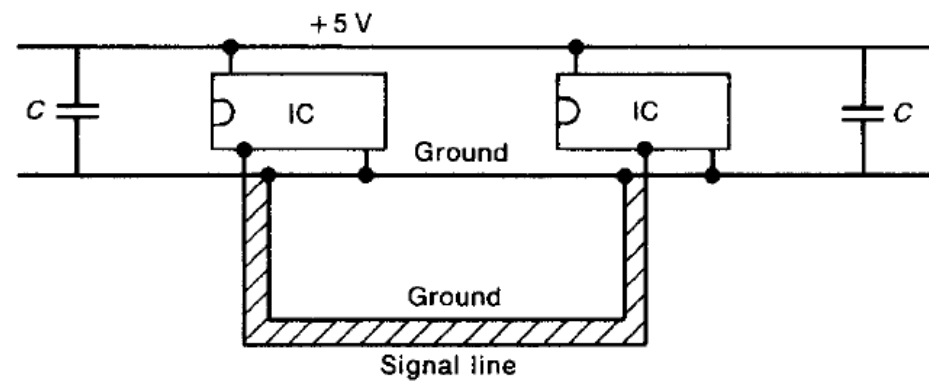


Elektromagnetska kompatibilnost

- minimizacija površina strujnih petlji – smanjenje emisije RF EMI



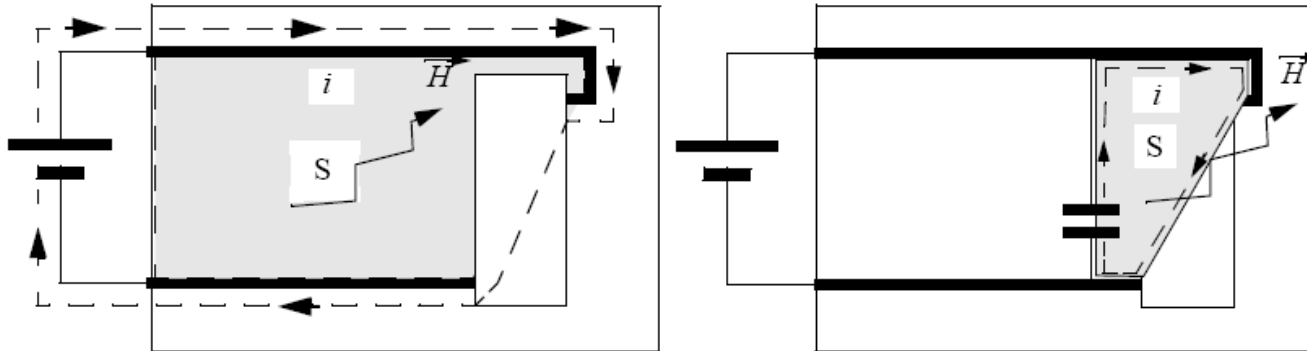
(a)



(b)

Elektromagnetska kompatibilnost

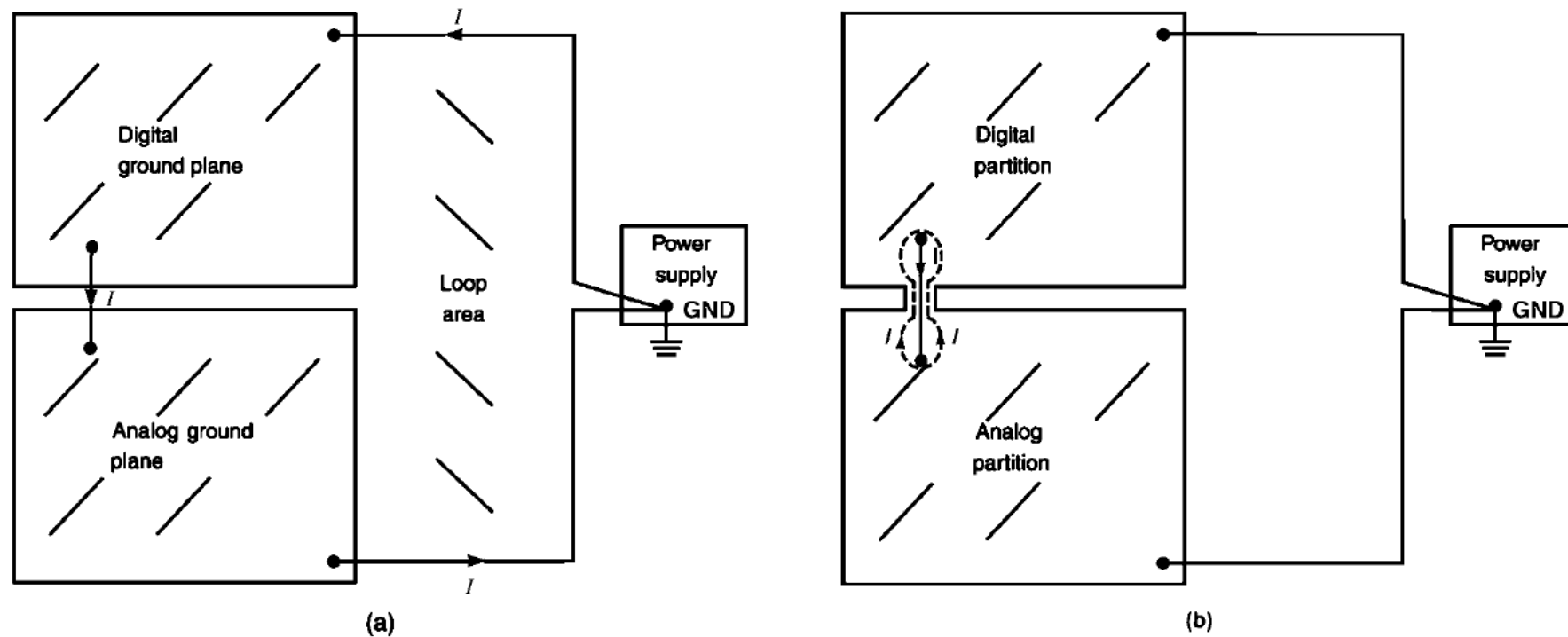
- minimizacija površina strujnih petlji – smanjenje emisije RF EMI



korištenje blokadnih kondenzatora za
smanjenje EMI

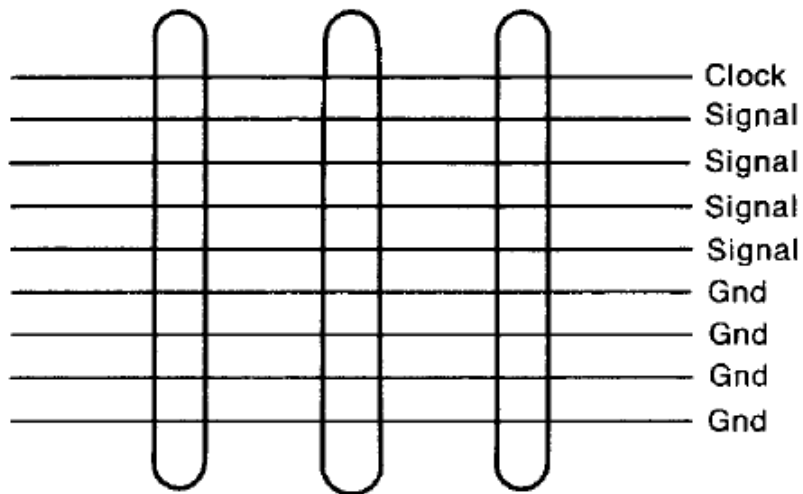
Elektromagnetska kompatibilnost

- minimizacija površina strujnih petlji – smanjenje emisije RF EMI

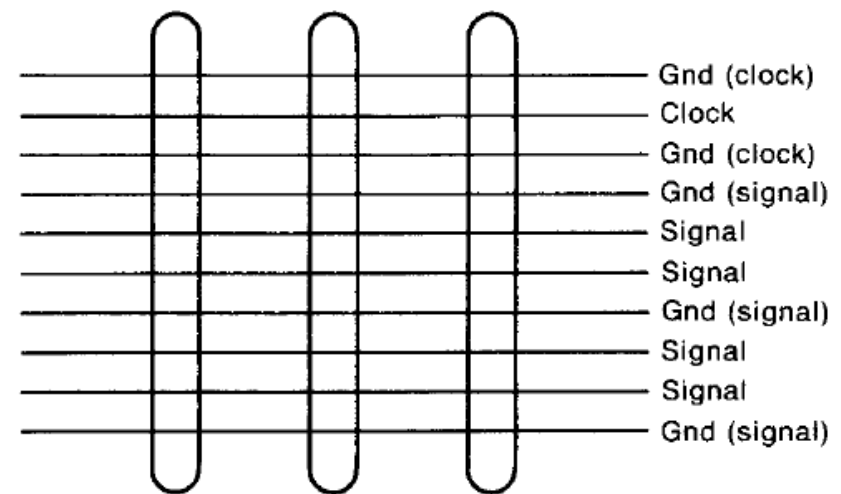


Elektromagnetska kompatibilnost

- utjecaj rasporeda vodova u *flat* kabelu na EMI RF emisiju:



loš raspored



dobar raspored