

Numerična metoda za izračun prenosne matrike netipičnih adapterjev za kalibracijo EMC opreme

Miha Kokalj¹, Boštjan Voljč¹, Borut Pinter¹, Matjaž Lindič¹, Zoran Svetik¹, Rado Lapuh²

¹Slovenski institut za kakovost in meroslovje

²Urad Republike Slovenije za meroslovje

miha.kokalj@siq.si

Numerical method for calculation of transfer matrix for non typical adapters used for calibration of EMC devices

Abstract. Stricter rules from electro technical industry each year demand better measurement uncertainty through revised standards. In the situation where measurement uncertainty exceeds limits defined by the standard better measurement system shall be set and uncertainty should be improved. It means that new measurement techniques should be developed, measurement setup needs reinvestigation, parameters that increase measurement uncertainty should be found and improved. This article presents method for characterizing non typical adapters with calculation of transfer matrix which enables correction of final result and uncertainty improvement. Method enables more accurate results and is applicable on other systems.

1 Uvod

Zahteve industrije, ki so vsako leto strožje, narekujejo kalibracijo merilne opreme z manjšo merilno negotovostjo. V primeru, ko merilna negotovost presega mejne vrednosti določene s strani standardov, je potrebno spremeniti oz. izboljšati merilni sistem. To v praksi pomeni ponovno ovrednotenje merilnega sistema in iskanje tistih parametrov, ki znatno vplivajo na merilno negotovost. V tem prispevku je predstavljena metoda karakterizacije netipičnih adapterjev z izračunom prenosne matrike, ki nam omogoča korekcijo in manjšo negotovost končnega rezultata. Metoda je zasnovana za splošno uporabo karakterizacije adapterjev, ki so sestavljeni iz koaksialnih in dvojno navitih (bifilarnih) delov.

2 Motivacija

Kalibracija naprav na mikrovalovnih frekvencah, kjer se uporabljajo klasični koaksialni konektorji (npr. N-tip, 3.5 mm, 2.92 mm), so zelo dobro meroslovno ovrednoteni in posledično vnašajo v sam merilni sistem majhno, predvsem pa znano merilno negotovost. V zadnjem času je opaziti pospešen trend kalibracij testnih naprav, ki se uporabljajo v EMC laboratorijih. Novejši EMC standardi namreč zahtevajo natančno kalibracijo EMC naprav. Klasični kalibracijski postopki ne dosegajo zahtevane točnosti zaradi netipičnih konektorjev, ki so prisotni na testnih napravah EMC. Tipični primer takšne EMC naprave je LISN (»Line Impedance Stabilization Network«).

Standard CISPR 16-1-2 [1] predpisuje kalibracijo treh parametrov: napetostni delilni faktor, izolacija in vhodna impedanca. V tem prispevku se bomo podrobneje ukvarjali s kalibracijo vhodne impedance. Prvi problem nastane ob pogledu na vhodni konektor LISN, kjer je potrebno pomeriti impedanco in fazo glede na referenčno ravnino.



Slika 1. LISN – ENV216

ENV216 je tipični predstavnik umetnega omrežja, ki ima na sprednji strani enofazni konektor. Enofazni konektor tehnično imenujemo tip F oz. CEE 7/4. Največji problem nastane pri kalibraciji vhodne impedance in faze, saj je bilo ugotovljeno, da razni adapterji močno vrtijo fazo in posledično dobimo slabe rezultate kalibracije z veliko negotovostjo, ki presega meje določene s strani standarda CISPR 16-1-2.

Prvi problem nastane, ko moramo določiti referenčno ravnino. Pri kalibraciji impedance je namreč potrebno kompenzirati impedanco na referenčni ravnini s kratkim stikom, oprtimi sponkami in 50 ohmskim bremenom (»SHORT, OPEN in LOAD«). To velja za kompenzacijo z vektorskim analizatorjem vezij (VNA). V standardu CISPR 16-1-2 referenčna ravnina ni jasno definirana, zato je določena na površini enofaznega oz. trifaznega konektorja.

Drugi problem nastane, ker s klasičnim VNA sistemom ni možno izvesti kompenzacije na referenčni ravnini, ker za povezavo VNA in LISN potrebujemo meroslovno ovrednoten adapter ter prehod iz N-tipa na CEE 7/4, da pridemo do referenčne ravnine.

Če že imamo adapter CEE 7/4 na N-tip, potem potrebujemo še »SHORT, OPEN, LOAD« standarde za kompenzacijo na strani CEE 7/4. Teh standardov v meroslovju ne poznamo.

3 Vpliv adapterja na meritev faze

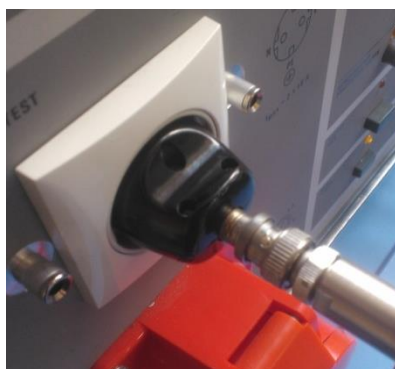
Izbira adapterja pri kalibraciji vhodne impedanice močno vpliva na meritev faze. To je bilo empirično dokazano z uporabo različnih adapterjev. Z VNA merilnikom smo merili impedanco in fazo na vhodnem konektorju LISN. VNA merilnik je bil kompenziran na koncu kablov. Uporabili smo tri različne adapterje in merili impedanco in fazo. Primerjava meritev impedanice z uporabo različnih adapterjev se je dobro ujemala. Različni adapterji torej ne vplivajo znatno na kalibracijo impedanice. Pri meritvi faze pa smo ugotovili veliko razhajanje med različnimi adapterji. Razlika se je večala s frekvenco, največje razlike nastanejo predvsem v mikrovalovnem področju pri frekvencah nad 10 MHz. Naslednje slike prikazujejo meritev impedanice in faze na enofaznem konektorju LISN z različnimi adapterji.



Slika 2. Adapter N-type/CEE 7/4

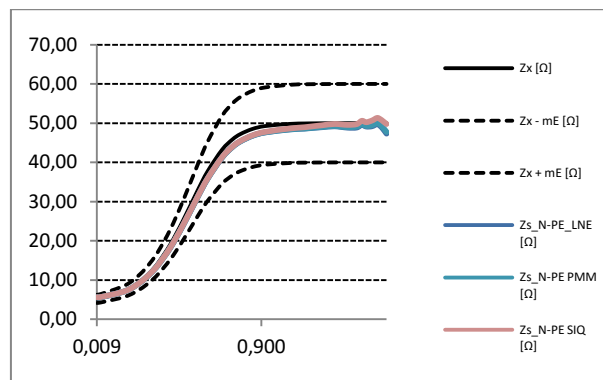


Slika 3. Adapter BNC2/CEE 7/4



Slika 4. Adapter BNC1/CEE 7/4

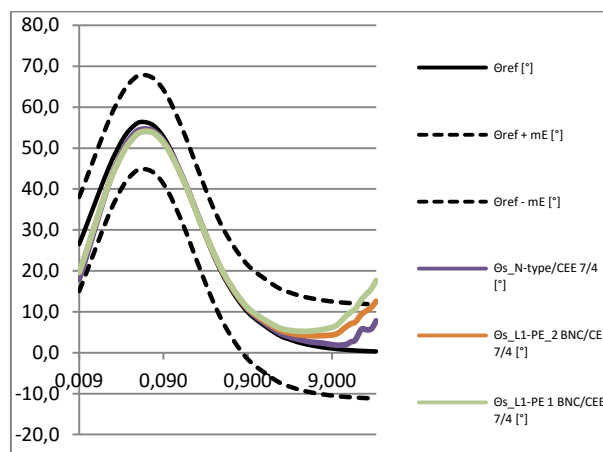
Naslednja slika (Slika 5) prikazuje rezultate meritev impedanice za vse tri adapterje v odvisnosti od frekvence (9 kHz do 30 MHz). Na grafu so črtkano prikazane mejne vrednosti impedanice, ki jih predvideva CISPR 16-1-2. Polna sredinska črta označuje referenčno vrednosti impedanice.



Slika 5. Primerjava meritev impedanice, $Z(f)$ do 30 MHz

Iz te slike lahko ugotovimo, da različni adapterji ne vplivajo znatno na meritev impedanice. Manjše razlike se začnejo pojavljati v mikrovalovnem področju.

Spodnja slika (Slika 6) prikazuje meritev faze za vse tri adapterje. Na grafu so črtkano prikazane mejne vrednosti faze, ki jih predvideva CISPR 16-1-2. Polna sredinska črta označuje referenčno vrednosti faze.



Slika 6. Primerjava meritev faze, $\Phi(f)$ do 30 MHz

Iz zgornjega grafa je razvidno, da različni adapterji močno vplivajo na meritev faze, poleg tega so meritve faze blizu oz. presegajo mejno vrednost faze, ki je določena v standardu. Večje razlike v meritvi faze je opaziti v mikrovalovnem področju.

4 Adapter

Izbira adapterja torej ključno vpliva na meritev faze. Za določene naprave kot je ESH2-Z5 je bil razvit posebni adapter, za katerega natančno poznamo prenosno S matriko. V tem primeru lahko korigiramo meritev faze in natančno določimo merilno negotovost. EMC naprave imajo celo vrsto netipično meroslovnih

konektorjev, zato za pravilne kalibracije potrebujemo okarakteriziran adapter za vsak konektor posebej.

Pri razvoju adapterja N-tip/CEE 7/4 je bilo ugotovljeno, da lahko prenosno matriko in njeno negotovost določimo z natančnim poznavanjem snovno-geometrijskih lastnosti posameznih delov adapterja. Pravilnost numerične metode je bila preverjena s tremi različnimi pristopi izračuna prenosne matrike. V tem prispevku je predstavljena najhitrejša in najbolj preprosta metoda, ki je v splošnem uporabna in jo lahko apliciramo za izračun prenosne matrike najrazličnejših adapterjev, katerih snovno-geometrijske lastnosti natančno poznamo.

Opis metode je predstavljen na adapterju N-tip/CEE 7/4, ki se uporablja za kalibracijo ESH2-Z5.

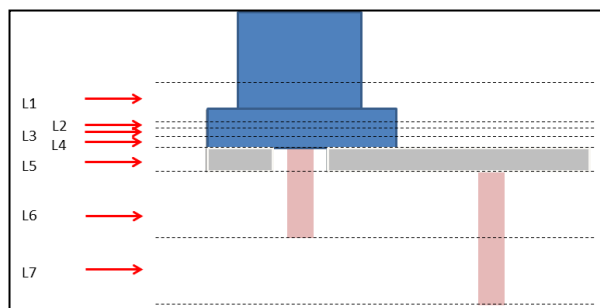


Slika 7. Adapter - prednja stran



Slika 8. Adapter – zadnja stran

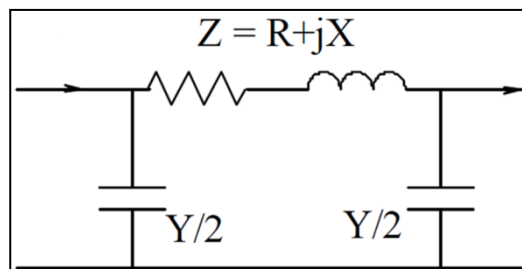
Fizična zgradba adapterja se lahko razdeli na šest individualnih plasti, kot kaže spodnja slika.



Slika 9. Posamezne plasti adapterja

Pet plasti adapterja ima koaksialno zgradbo, šesta plast je bifilarna. Za vsako posamezno plast je bila izračunana ABCD prenosna matrika, ki nam omogoča kaskadno množenje za izračun končne ABCD matrike. Ta se nadalje transformira v S matriko, normirano na karakteristično impedanco 50 Ω.

Plasti adapterja se modelirajo z modelom za srednje dolge linije »π-model«. Posamezna plast je sestavljena iz elementov, kot kaže slika.



Slika 10. »π-model«

Za koaksialne plasti izračunamo upornost R , prevodnost G , kapacitivnost C in induktivnost L po naslednjih enačbah:

$$C = \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon_r}{\ln\left(\frac{b}{a}\right)} \cdot len \quad (1)$$

$$L = \frac{\mu_0\mu_r}{2\pi} \cdot \ln\left(\frac{b}{a}\right) \cdot len \quad (2)$$

$$R = \frac{R_s}{2\pi} \left(\frac{1}{b} + \frac{1}{a} \right) \quad (3)$$

$$G = \frac{2\pi\sigma}{\ln\left(\frac{b}{a}\right)} \quad (4)$$

kjer je

- ϵ_r relativna dielektričnost dielektrika,
- ϵ_0 dielektričnost praznega prostora,
- μ_r relativna permeabilnost dielektrika,
- μ_0 permeabilnost praznega prostora,
- b zunanji premer koaksialne linije,
- a notranji premer koaksialne linije,
- len dolžina koaksialne plasti,
- R_s ohmska prevodnost dielektrika zaradi kožnega pojava,
- σ prevodnost dielektrika.

Impedanco $Z_{bifilar}$, kapacitivnost $C_{bifilar}$ in induktivnost $L_{bifilar}$ bifilarnega vodnika izračunamo po naslednjih enačbah:

$$Z_{bifilar} = \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{\mu_0\mu_r}{\epsilon_0\epsilon_r}} \ln\left(\frac{D}{d} + \sqrt{\left(\frac{D}{d}\right)^2 - 1}\right) \quad (5)$$

$$C_{bifilar} = \frac{\pi\epsilon_0\epsilon_r}{\ln\left(\frac{D}{d} + \sqrt{\left(\frac{D}{d}\right)^2 - 1}\right)} \cdot len \quad (6)$$

$$L_{bifilar} = \frac{\mu_0\mu_r}{\pi} \ln\left(\frac{D}{d} + \sqrt{\left(\frac{D}{d}\right)^2 - 1}\right) \cdot len \quad (7)$$

kjer je

- D razdalja med bifilarnima vodnikoma,
- d premer posameznega bifilarnega vodnika.

5 Prenosna matrika ABCD

Matrika ABCD je prenosna matrika, ki nam omogoča množenje zaporedno urejenih matrik in ni normirana na karakteristično impedanco kot sta to S in T matriki. Na ta način enostavno dobimo končno prenosno matriko sistema, ki jo nadalje lahko normiramo na karakteristično impedanco. Pogosto je to S matrika normirana na 50 Ω, saj v meritvah pogosto operiramo z

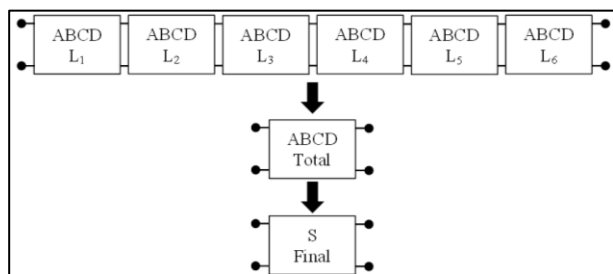
S parametri, ki nam dajejo informacijo o refleksijah in slabljenju. ABCD je kompleksna matrika, njene elemente izračunamo po naslednjih enačbah:

$$A = 1 + \frac{ZY}{2} \quad (8)$$

$$B = Z \quad (9)$$

$$C = Y \left(1 + \frac{ZY}{4} \right) \quad (10)$$

$$D = 1 + \frac{ZY}{2} \quad (11)$$



Slika 11. Izračun končne kompleksne S matrike

Kompleksna ABCD matrika je izračunana za vsako frekvenco posebej do 30 MHz. Ko enkrat poznamo končno S matriko adapterja, jo lahko uporabimo kot:

- Dodatno negotovost končne meritve. To možnost izberemo takrat, ko adapter minimalno vpliva na končni rezultat.
- Korekcijo in dodatno negotovost končne meritve. Ko je vpliv adapterja na končno meritev znaten, upoštevamo korekcijo in tako dobimo bolj točno meritev. Negotovost končnega rezultata je v tem primeru manjša. Ne smemo pozabiti na dodatno negotovost zaradi negotovosti prenosne matrike.

Pri izdelavi adapterja je vedno treba stremeti po tem, da bo prenosna matrika novo razvitega adapterja minimalno vplivala na končno meritev. Čeprav je možno narediti korekcijo, je rezultat vedno boljši, če je korekcija majhna v primerjavi s samo vrednostjo meritve brez korekcije.

6 Izračun negotovosti

Izračun negotovosti je pri opisani metodi precej kompleksen. Ker operiramo s kompleksnimi matrikami, kjer nastopa veliko število parametrov, je izračun negotovosti simuliran z metodo »Monte Carlo«. Negotovost izhaja iz negotovosti snovno-geometrijskih lastnosti adapterja. Parametri, ki prinašajo merilno negotovost so: notranji in zunanji premer vodnikov, relativna dielektričnost dielektrika, razdalja posamezne plasti adapterja, prevodnost in upornost materialov. Celoten postopek izračuna S matrike adapterja in njegova negotovost je bila izračunana s simulacijskimi postopki v matematičnem programu MATLAB. Snovno-geometrijske negotovosti so bile simulirane s pravokotno porazdelitvijo. Izvedeno je bilo 10.000 simulacij. Takšno število simulacij zagotavlja stabilne rezultate.

7 Zaključek

Ugotovili smo, da netipični adapterji znatno vplivajo na meritev faze. Vpliv se večja z višanjem frekvence in je precej izrazit v mikrovalovnem področju. Napaka impedance narašča počasneje. Z opisano simulacijsko metodo lahko izračunamo prenosno matriko adapterja, ki jo nadalje uporabimo kot negotovost oz. jo upoštevamo kot korekcijo končne meritve. Na ta način odpravljamo sistemsko napako merilnega sistema in izboljšujemo kvaliteto kalibracije EMC ter druge opreme. Opisana numerična metoda je splošno uporabna za izračun prenosne matrike adapterjev, ki so sestavljeni iz koaksialnih in bifilarnih plasti.

Literatura

- [1] CISPR 16-1-2 Edition 1.2 2006-08, Reference number CISPR 16-1-2: 2003+A1:2004+A2:2006.
- [2] M. Kokalj, B. Voljč, B. Pinter, M. Lindič, Z. Svetik, R. Lapuh: Zbornik triindvajsete mednarodne Elektrotehniške in računalniške konference ERK 2014, 22. - 24. September 2014, Portorož, Slovenija (ERK_Ref)
- [3] M. Kokalj, B. Pinter, M. Lindič, François Ziade: CPEM 2014, Rio de Janeiro, Brazilija

Numerična metoda za izračun prenosne matrike netipičnih adapterjev za kalibracijo EMC opreme

Miha Kokalj

Portorož, 23. 09. 2015

Vsebina

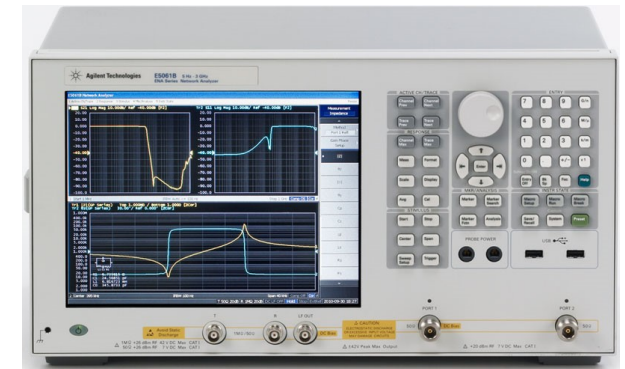
- Motivacija
- Opis problema
- Realizacija metode
- Rezultati
- Uporaba
- Zaključek

Motivacija

- Vedno več zahtev strank po sledljivih kalibracijah opreme z netipičnimi metrološkimi konektorji (EMC oprema)
- Tipična predstavnika opreme sta LISN, CDN
- Najbolj problematična je meritev vhodne impedance, predvsem meritev faze na konektorjih: CEE 7/4, banana konektor, USB, BNC, UTP,...itd.)



Opis problema

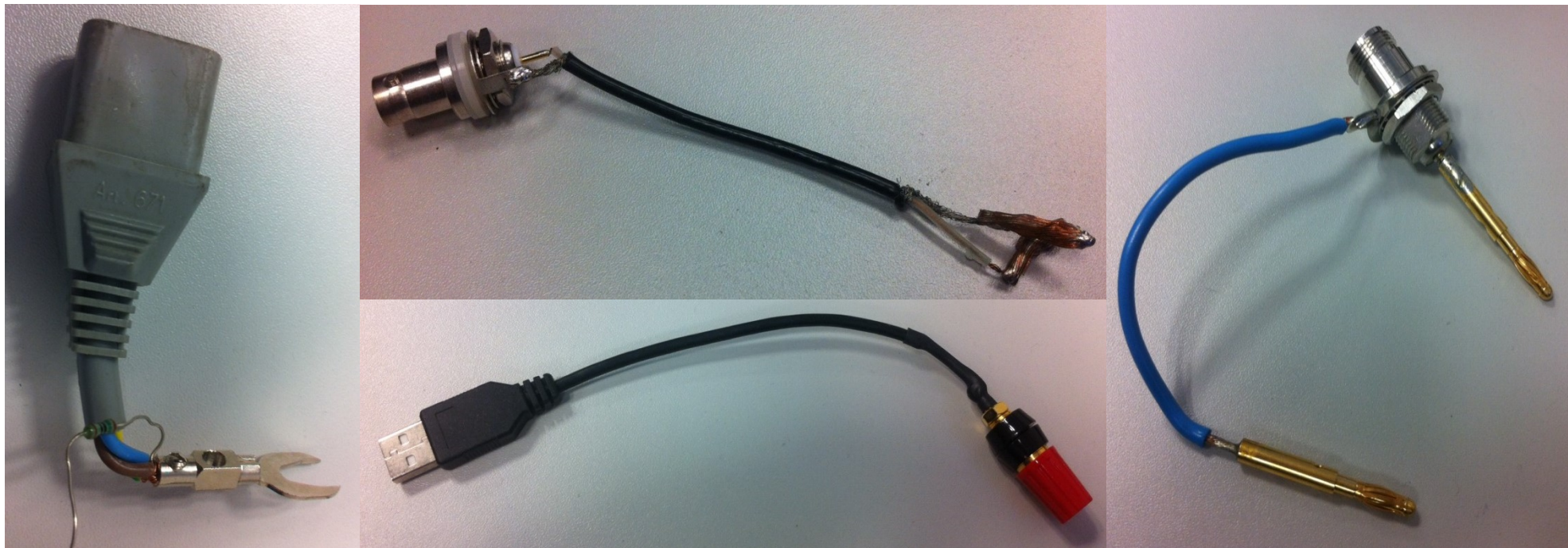


- Za kalibracijo vhodne impedance in faze se uporablja VNA z N-type konektorji (lahko tudi 3,5mm, 2,92 mm, 2,4 mm...
 - OPEN, SHORT, LOAD (N-type) kompenzacija določi referenčno ravnino (kompenzacija impedance in faze)
 - Frekvenčno območje kalibracijskega kita do 18 GHz, Return Loss -23 dB (18 GHz) do **-50 dB (2 GHz)** Dobra prilagoditev
-
- Z uporabo adapterjev prestavimo referenčno ravnino in izgubimo sledljivost meritev Slaba prilagoditev

Uporaba različnih adapterjev

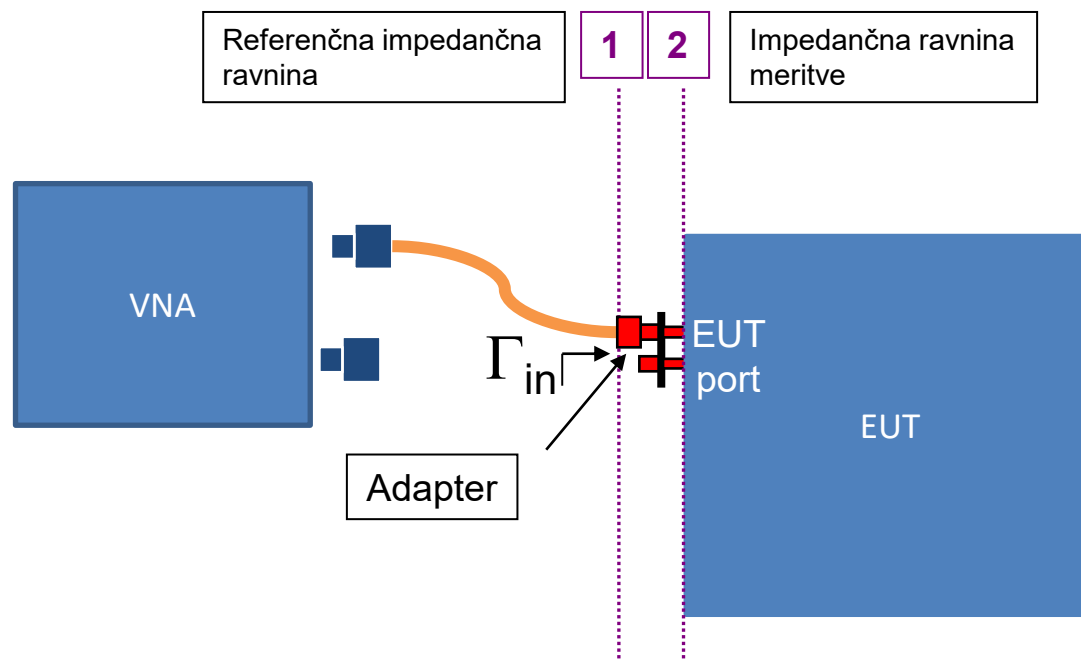


Adapterji s kabli



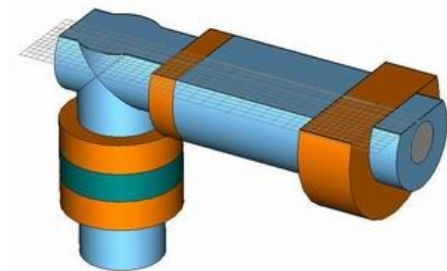
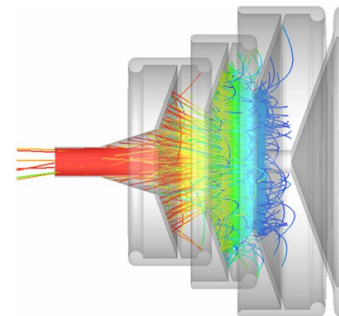
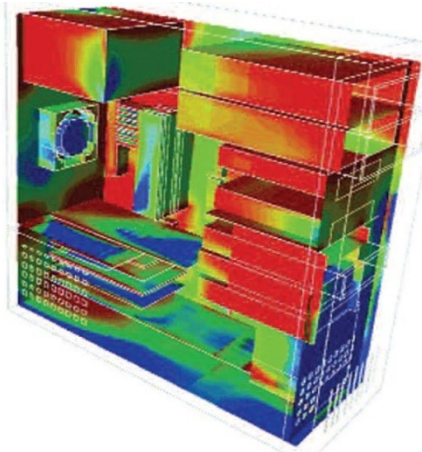
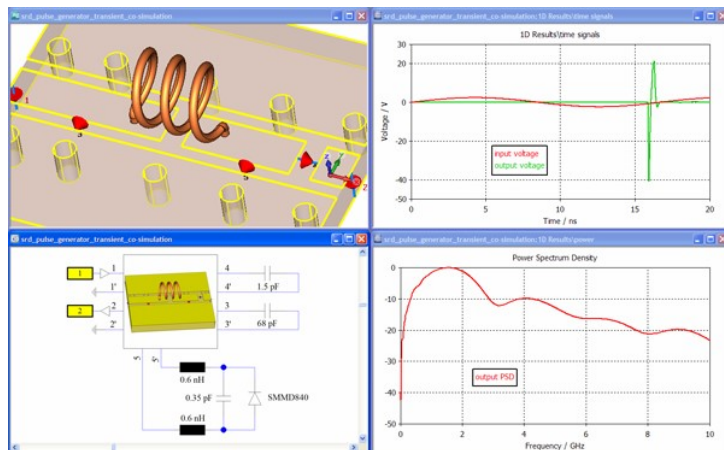
Metode kompenzacije

- Kompenzacija z izračunljivim adapterjem
 - Simulacija prenosne matrike S
- Kompenzacija z izračunljivim kompletom OPEN, SHORT, LOAD



Kompenzacija z izračunljivim adapterjem

- Z poznavanje snovno geometrijskih lastnosti uporabljenega adapterja
 - Izračun prenosne matrike preko simulacijskih orodij (primer CST Microwave Studio)
 - Izračun prenosne matrike preko simulacijskih orodij (primer MATLAB)
- Verifikacija metode je bila opravljena pri projektu IND60 preko primerjave izračunanih prenosnih matrik
- Poznavanje prenosne matrike nam omogoči rekalkulacijo impedance na referenčno o ravnino



Kompenzacija z izračunljivim kompletom OPEN, SHORT, LOAD

- Meritve impedančnih parametrov LCR
- Geometrijske lastnosti adapterja
- Izračun prenosne matrike OPEN, SHORT, LOAD



Poznamo S11



Preko LCR
simuliramo
$$\begin{bmatrix} s_{11} & s_{12} \\ s_{21} & s_{22} \end{bmatrix}$$



Rekalkulacija s11' na koncu
banana konektorjev

Katero metodo izbrati?

- Če je vpliv adapterja majhen v primerjavi z merjeno vrednostjo, potem izberemo metodo z izračunljivim adapterjem. Naredimo korekcijo ali samo upoštevamo njegovo negotovost (npr. 0,5 ohm in 2°)
- Če je vpliv velik v primerjavi z merjeno vrednostjo, izberemo metodo z izračunljivim kompletom OPEN, SHORT, LOAD. (npr. 3-fazni adapter zavrti fazo za 17° pri 30 MHz)

Uporaba

- Meritev impedance z netipičnimi adapterji z rekalkulacijo impedančne ravnine nam omogoča zagotavljanje sledljivost do SI enot
- Izračun prenosne matrike različnih adapterjev in naprav z znano snovno geometrijsko zgradbo
- Pomoč pri konstrukciji novih naprav (adapterji, filtri, VF vezja,...)
- Iskanje napak pri VF vezjih, napravah, vodih

Zaključek

- Razdelana metoda, ki omogoča pravilne meritve impedance in faze z ovrednoteno merilno negotovostjo
- Metoda nam je v veliko pomoč pri kalibraciji EMC naprav (LISN, CDN, ESD)
- Metoda je splošno uporabna za različna področja