

# Razvoj adapterja za kalibracijo umetnih omrežij

Miha Kokalj, Boštjan Voljč, Borut Pinter, Matjaž Lindič, Zoran Svetik, Rado Lapuh

Slovenski institut za kakovost in meroslovje, SIQ Ljubljana  
E-pošta: miha.kokalj@siq.si

## Development of adapter for calibration of artificial mains networks

*Achieving Electromagnetic Compatibility (EMC) compliance for electrical and electronic products is a must before a product can enter the market. EMC measurements and validation are necessary during the whole period of development of products. However, development and maintenance of an EMC measurement facility in accordance with standards is a heavy load for industry. Research on the performance of existing alternative methods and the development of new alternative methods are crucial for the European industry. Techniques to determine the uncertainty of measurements have to be developed to comply with the required reproducibility of measurements.*

*This article presents difficulties in AMN (Artificial Mains Network) calibration. The article is based on EU funded project IND60 EMC: Improved EMC test methods in industrial environments. The project is still in process.*

### 1 Uvod

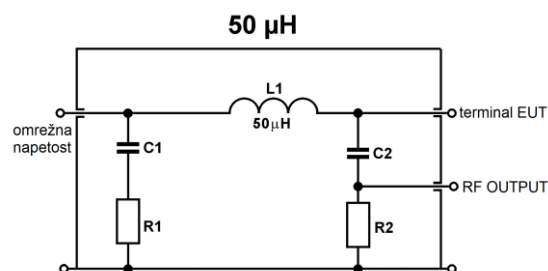
Elektromagnetna kompatibilnost (EMC) elektronskih naprav je nujna, preden elektronski izdelek pride na trg. Validacijski postopki EMC so potrebni že tekom razvoja izdelka. Razvoj in vzdrževanje merilnega sistema po EMC standardih predstavlja težko breme za industrijo. Analiza in razvoj obstoječih in alternativnih merilnih EMC metod, ki bodo omogočale enostavnejše in kvalitetnejše merilne procese v industriji, so nujno potrebni za ohranjanje visokih standardov evropske elektroindustrije.

V tem prispevku je predstavljena problematika kalibracije umetnih omrežij (AMN - Artificial Mains Network). Predstavljena problematika in rešitve so del večjega projekta IND60 EMC (Improved EMC test methods in industrial environments), ki se delno financira iz EU. Projekt je še teku.

### 2 Umetno omrežje

Umetno omrežje ali AMN je instrument, ki zagotavlja natančno definirano impedanco testirani napravi (EUT - Equipment Under Test). AMN sklaplja napetostne motnje od EUT do merilnega sprejemnika ter ločuje testirano vezje EUT od omrežne napetosti. AMN je torej naprava, ki se uporablja kot merilnik radiofrekvenčnih emisij in občutljivosti. Tovrstne meritve se praviloma izvajajo po EMC/EMI standardih (npr. CISPR, IEC, CENELEC, FCC, MIL-STD, itd).

AMN ima tri priključne terminale: prvi terminal je namenjen za priključitev omrežne napetosti, drugi je namenjen za priključitev testirane naprave EUT in tretji je izhod za meritve radio frekvenčnih motenj na katerega se priključi merilni sprejemnik.



Slika 1: Blok shema umetnega omrežja



Slika 2: Umetno omrežje podjetja R&S, tip: ESH2-Z5

### 3 Impedanca umetnega omrežja

Specifikacije impedanca AMN vključujejo amplitudo in fazo. Impedanca terminala je izmerjena proti ozemljitvi, ko je RF OUTPUT zaključen s 50 Ω.

Impedanca EUT terminala definira impedanco, ki je pri meritvi generirana na testirani napravi EUT. Ko merilni sprejemnik ni povezan na RF OUTPUT, je potrebno ta terminal zaključiti s 50 Ω. V nasprotnem primeru bo impedanca, ki jo čuti EUT, različna od 50 Ω, kar bo vplivalo na merilni rezultat. Za še boljše zaključitev terminala RF OUTPUT se lahko uporabi 10 dB slabilnik, ki naj ima VSWR največ 1,2.

### 4 Kalibracija umetnega omrežja

Kalibracija impedanca EUT terminala se izvaja z LCR merilnikom pri nižjih frekvencah od 1 MHz in z VNA pri frekvencah nad 1 MHz. AMN je lahko eno ali trifazni. Pri enofaznih AMN-jih se meri impedanca med

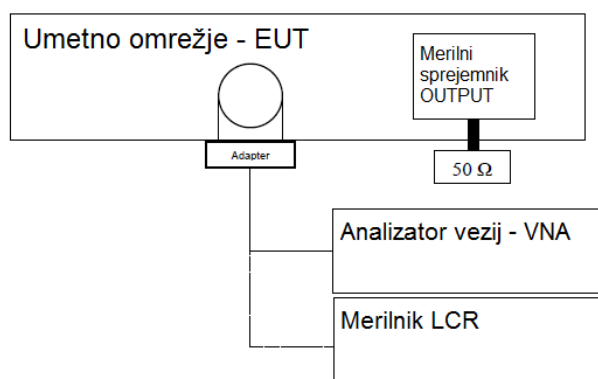
vodniki L-PE in N-PE, pri trifaznih pa med N-PE, L1-PE, L2-PE in L3-PE.

EMC standardi predvidevajo različne nominalne impedance glede na frekvenčni pas in vrednosti induktivnosti ter upornosti:

- 50  $\mu$ H + 5  $\Omega$  (9 kHz – 150 kHz: band A),
- 50  $\mu$ H (150 kHz – 30 MHz: band B),
- 5  $\mu$ H + 1  $\Omega$  (150 kHz – 108 MHz: band C),
- 150  $\Omega$  (9 kHz – 150 kHz: band A),
- 150  $\Omega$  (150 kHz – 30 MHz: band B).

#### 4.1 Kalibracija impedance – merilna postavitvev

Pri kalibraciji impedance je potrebno RF OUTPUT zaključiti s preciznim 50  $\Omega$  zaključkom. LCR ali VNA se priključi na EUT terminal preko posebnega adapterja.



Slika 3: Kalibracija impedance

Merjenje impedance poteka po klasičnih postopkih. Na referenčni impedančni ravnini je potrebno kompenzirati impedanco merilnih vezi in priključkov na merilni inštrument z odprtimi sponkami, kratkim stikom in 50  $\Omega$  bremenom. Poskrbeti je potrebno le, da je impedanca kompenzacije čim manjša v primerjavi z nominalno vrednostjo impedance terminala EUT. V nasprotnem primeru namreč hitro lahko pride do napak, saj že majhna napaka oz. negotovost pri kompenzaciji znatno vpliva na merilni rezultat impedance.

Problematika merjenja impedance je v priključitvi na terminal EUT. Enofazna umetna omrežja imajo priključek tipa »Schuko« CEE 7/4. Kompenzacija odprtih sponk, kratkega stika in bremena 50  $\Omega$  je meroslovno sledljivo definirana na konektorjih tipa *N* ali *BNC*. V nasprotju s tem CEE 7/4 nima nobene meroslovne podlage. Za zagotovitev sledljive kalibracije obstajata dve možnosti.

Prva je, da se kompenzacija izvede na koncu priključnih kablov na klasičen način. Povezavo med *N*-tip kablji in terminalom EUT izvedemo s pomočjo izračunljivega adapterja. V tem primeru bi bilo potrebno razviti izračunljiv adapter, ki mora biti okarakteriziran v visokofrekvenčnem smislu s pomočjo *S*-parametrov.

Druga možnost je, da se kompenzacija izvede na koncu adapterja. V tem primeru ne potrebujemo izračunljivega *N*-tip/CEE 7/4 adapterja, vendar pa

potrebujemo nove etalone za odprte sponke, kratek stik in breme 50  $\Omega$  na konektorjih CEE 7/4.

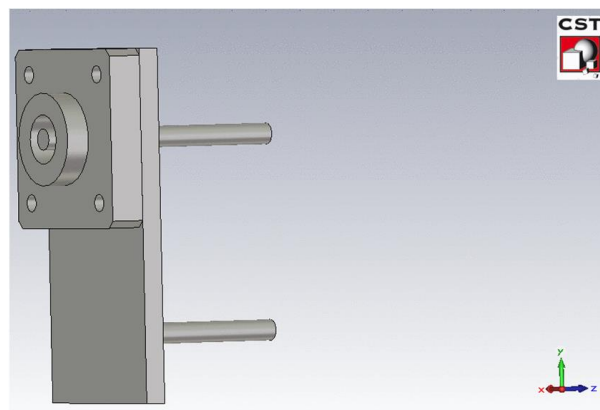
Ker CEE 7/4 nima nobenega meroslovnega ozadja, nima smisla razvijati novih etalona, zato je bolj smiselna rešitev razviti nov izračunljiv adapter *N*-tip/CEE 7/4, ga ovrednoti in njegove lastnosti upoštevati kot korekcijo ali merilno negotovost pri kalibraciji impedance AMN.

## 5 Adapter N-tip/CEE 7/4

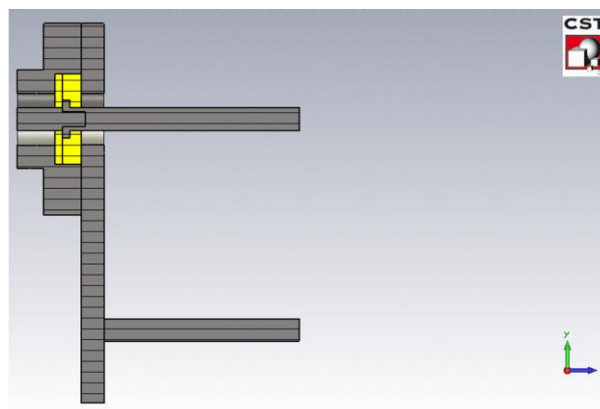
Razvoj adapterja *N*-tip/CEE 7/4 poteka v sklopu projekta *IND60 EMC*. Gre za medsebojno sodelovanje med nacionalnimi laboratoriji Slovenije (*SIQ*) in Francije (*LNE*).

Prva faza razvoja je potekala v programu AutoCad, kjer je bil izrisan 3D model adapterja. Geometrijske lastnosti so bile določene na podlagi izkušenj. Model adapterja se je potem izvozil v program za elektromagnetne simulacije.

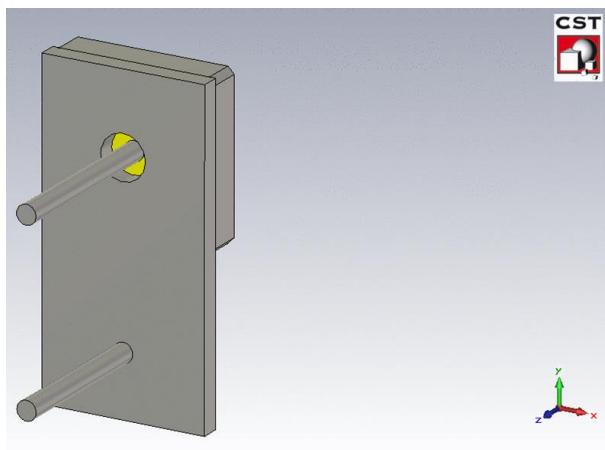
Druga faza razvoja je potekala v programu CST Microwave Studio, ki nam je omogočal 3D elektromagnetno simuliranje od frekvence 9 kHz do 108 MHz. Program upošteva geometrijo in material adapterja ter na podlagi teh podatkov numerično simulira elektromagnetne lastnosti (*S*-parametre). Izgube v numeričnih izračunih niso bile upoštevane.



Slika 4: Adapter N-tip/banana



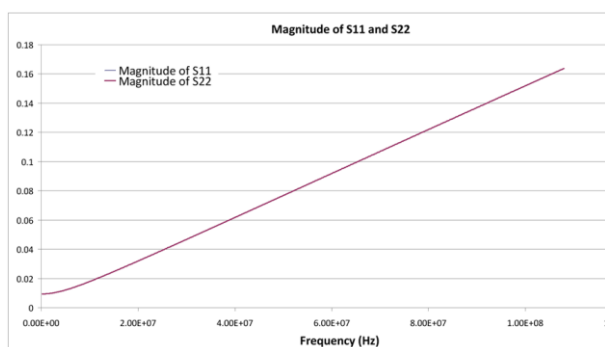
Slika 5: Prerez adapterja



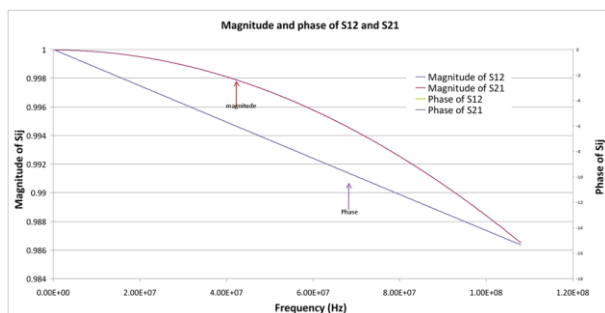
Slika 6: EUT stran

Slika 4, slika 5 in slika 6 prikazujejo model adapterja v programu CST Microwave Studio. Ta model je bil na podlagi simulacij dodelan tako, da daje dobre rezultate tudi pri visokih frekvencah.

Naslednja grafa prikazujeta rezultate simulacij iz programa CST. Prikazani sta refleksiji  $S_{11}$  in  $S_{22}$  ter amplituda in faza transmisije  $S_{12}$  in  $S_{21}$ .



Slika 7:  $S_{11}$  in  $S_{22}$



Slika 8:  $S_{21}$  in  $S_{12}$

Pri frekvenci 108 MHz se pojavi variacija faze  $-16^\circ$ , ki je posledica bifilarne prenosne linije, ki je potrebna za priklop na LISN ESH2-Z5.

Simulacije kažejo, da je prilagojenost obeh priključkov ustrezna na celotnem simuliranem frekvenčnem območju. Še posebej pa je prilagojenost dobra do 30 MHz.

### 5.1 Ovrednotenje karakteristike adapterja

Za izračun elektromagnetnih lastnosti izračunljivega adapterja so bili izbrani trije različni pristopi.

Prvi pristop temelji na analitičnem modelu, ki je sestavljen iz komponent induktivnosti, kapacitivnosti in upornosti. Gre za modelirano vezje, kjer se določijo vrednosti  $L$ ,  $R$  in  $C$  na podlagi LCR meritev posameznih sestavnih delov adapterja. Nato sledi izračun frekvenčnega odziva in prilagojenosti vhoda ter izhoda modeliranega vezja.

Drugi pristop temelji na simulacijah v programu Comsol 3D Simulation. Frekvenčni odziv in prilagojenost se izračunata z upoštevanjem  $L$  in  $C$  elementov, ki jih program izračuna na podlagi geometrijskega modela in uporabljenih materialov, iz katerega je sestavljen adapter.

Tretji pristop za izračun merilne negotovosti izračunljivega adapterja je uporaba programa CST 3D, ki simulira elektromagnetne lastnosti z uporabo  $S$  parametrov. Program upošteva lastnosti uporabljenega materiala in geometrijo adapterja.

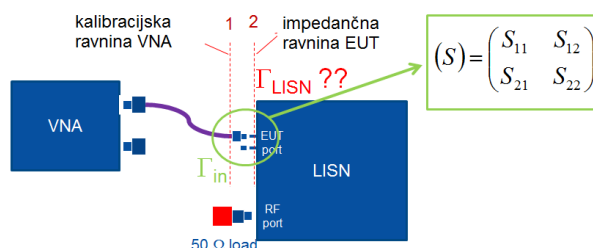
Uporaba treh različnih simulacijskih pristopov poveča zaupanje v izračunane lastnosti adapterja ( $S_{11}$ ,  $S_{22}$ ,  $S_{21}$ ,  $S_{12}$ ).

## 6 Izračun impedance LISN

Iskana vhodna impedance LISN naprave na terminalu EUT se izračuna po enačbi:

$$\Gamma_{LISN} = \frac{S_{11} - \Gamma_{in}}{S_{22}(S_{11} - \Gamma_{in}) - S_{12}S_{21}} \quad (1)$$

Matrika  $S$  parametrov ( $S_{11}$ ,  $S_{12}$ ,  $S_{21}$  in  $S_{22}$ ) predstavlja korekcijo zaradi uporabljenega izračunljivega adapterja.  $\Gamma_{in}$  je izmerjena vrednost refleksijskega koeficienta z uporabo VNA, ki je bil kalibriran na koncu kablov z odprtimi sponkami, kratkim stikom in  $50 \Omega$  bremenom.



Slika 9: Merilna shema za merjenje impedance LISN na terminalu EUT

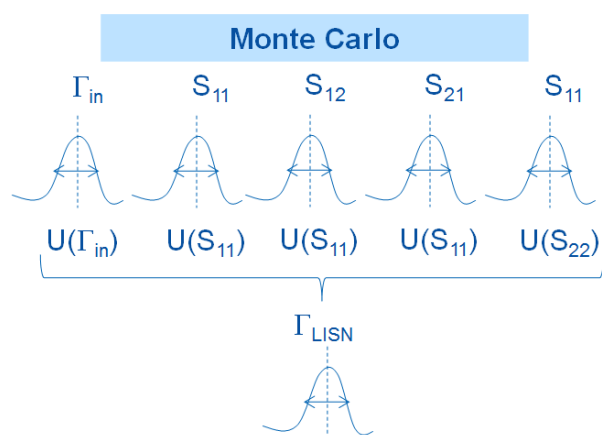
Opisana merilna metoda nam da informacijo o refleksijskem koeficientu  $\Gamma_{LISN}$  na terminalu EUT. Če želimo izračunati impedance terminala EUT, uporabimo enačbo:

$$Z_{LISN} = Z_0 \frac{1 + \Gamma_{LISN}}{1 - \Gamma_{LISN}} \quad (2)$$

## 7 Ovrednotenje merilne negotovosti

Programska oprema za mikrovalovne simulacije nam omogoča določitev refleksijskih koeficientov  $S_{11}$ ,  $S_{12}$ ,  $S_{21}$  in  $S_{22}$ . To pomeni, da imamo informacijo o vhodni in izhodni prilagojenosti adapterja ter o transmisiji.

Negotovost se izračuna s pomočjo Monte Carlo simulacije, kjer simuliramo kombinacijo faze in amplitude posameznega  $S$  parametra v območju njegove negotovosti. Amplitude za simulacijo so določene naključno okoli srednje vrednosti, ki so bile izračunane v razvojnih postopkih. Negotovost je izračunana kot standardna deviacija naključno izbranih amplitud in faz okoli srednje vrednosti. Postopek se izvaja z uporabo v programu Visual Basic, ki naključno generira faze in amplitude okoli srednje vrednosti ter izračuna 100.000 vzorcev prilagoditvenih koeficientov (*ang.* mismatch), iz katerih se potem izračuna srednja vrednost in standardna deviacija  $\Gamma_{LISN}$ , ki velja kot negotovost. Omenjen postopek ima normalno verjetnostno porazdelitev.



Slika 10: Metoda Monte Carlo

## 8 Zaključek

Standard CISPR 16-1-2 določa, da se impedanca LISN kalibrira na terminalu EUT. VNA deluje na konektorjih tipa  $N$ , zato je kalibracija možna le na koncu kablov. LISN naprave imajo nestandardne priključne konektorje, ki so metrološko nepodprti, zato je potrebno izdelati izračunljiv adapter, ki ima dobro transmisijo in prilagojenost, da je adapter uporaben tudi na področju mikrovalovnih frekvenc. V sklopu projekta IND60 EMC je bil razvit izračunljiv adapter  $N$ -tip/CEE 7/4. Izvedene so bile mikrovalovne simulacije elektromagnetnega polja, upoštevana in optimizirana je bila geometrija adapterja. Na podlagi teh meritev je bila določena  $S$ -matrika, ki opisuje karakteristika izračunljivega adapterja. Cilj tega projekta je bil torej določiti  $S$ -matriko  $N$ -type/CEE 7/4 adapterja, ki se lahko upošteva pri preračunu dejanske impedance terminala EUT.

Trenutno še vedno potekajo meritve in interkomparacije za čim boljše ovrednotenje novega adapterja. Ko bodo testiranja končana in potrjena, bo adapter na voljo za kalibracijske laboratorije, ki se ukvarjajo s kalibracijo LISN naprav. Poleg merjenja impedance, bo adapter uporaben tudi za kalibracijo napetostnega faktorja (voltage division factor), ki je

eden od zahtevanih parametrov, ki jih predpisuje standard IEC, CISPR 16-1-2, Izdaja 1.2.



Slika 11: Prvi prototip adapterja

## 9 Delo za prihodnost

V projektu se trenutno ukvarjamo z enofaznim adapterjem. EMC laboratoriji za svoje delo uporabljajo tudi trifazne LISN naprave, obstajajo pa tudi drugi eksotični priključki. Za vsak tip konektorja bo potrebno razviti nov izračunljiv adapter. Zahteve po EMC testiranju se povečujejo vsako leto. Novi standardi zahtevajo kalibracijo vhodne impedance do vedno višjih frekvenc. V zadnjem času se pojavlja porast EMC testiranja v igralniški in avtomobilski industriji, kjer so zahtevane frekvence do 300 MHz. Mikrovalovi zahtevajo posebno pazljivost pri izdelavi, saj mora biti zagotovljena dobra transmisija in čim boljša prilagojenost. V nasprotnem primeru, lahko pri kalibraciji dobimo nesmiselne rezultate, ki onemogočajo pravilno kalibracijo EMC naprav in povsem onemogočajo pravilno EMC testiranje.

## Literatura

- [1] IEC, CISPR 16-1-2, Edition 1.2, 2006-08
- [2] M.Kokalj, B.Pinter, M.Lindič, F.Ziade: CPEM 2014, 24.-29. Avgust 2014, Rio de Janeiro, Brazilija