

Преслушавање између паралелних проводника

Crosstalk Between Parallel Conductors

Дања Горонић, Калман Бабковић, *Факултет техничких наука, Нови Сад*

**Студијски програм – ЕНЕРГЕТИКА,
ЕЛЕКТРОНИКА И ТЕЛЕКОМУНИКАЦИЈЕ**

Кратак садржај – У овом раду извршена су експериментална испитивања капацитивног преслушавања између два паралелна проводника. Циљ мјерења је утврђивање утицаја фреквенције сигнала, међусобног растојања проводника и оптерећења на ниво преслушавања. Резултати добијени мјерењем помоћу осцилоскопа и спектралног анализатора упоређени су са теоријским прорачунима и симулацијама у програму MicroCap, како би се испитала усклађеност реалног и идеалног модела система.,

Кључне речи: EMI, EMC, капацитивна спрега, преслушавање, MicroCap

Abstract – In this paper, experimental investigations of capacitive crosstalk between two parallel conductors were carried out. The aim of the measurements is to determine the influence of signal frequency, mutual conductor spacing, and load on the level of crosstalk. The results obtained by measurements using an oscilloscope and a spectrum analyzer were compared with theoretical calculations and simulations in the MicroCap software, in order to examine the agreement between the real and ideal system models

Keywords: EMI, EMC, capacitive coupling, crosstalk, MicroCap

НАПОМЕНА: Овај рад проистекао је из мастер рада чији ментор је био др Калман Бабковић, ванредни професор.

1. УВОД

У савременим електронским системима, поузданост и интегритет сигнала постали су један од кључних захтијева у дизајну и развоју уређаја. Како технологија напредује, електронске компоненте постају све мање, брже и сложеније, што доводи до повећања густине компоненти на штампаним плочама и пораста радних фреквенција. Због тога електромагнетска компатибилност (ЕМС) добија све већи значај, јер чак и мали поремећаји у електромагнетском окружењу могу довести до деградације перформанси, нестабилности система или потпуног кvara уређаја. Због повећања сложености савремених електронских уређаја, повећава се и значај разумјевања паразитних

ефеката који могу нарушити правилан рад система. Један од најзначајнијих феномена који се јавља јесте преслушавање (енг. crosstalk). У овом раду акценат је стављен на испитивање преслушавања, са циљем идентификације механизма капацитивног спрезања између проводника. Поред анализе спрезања између бакарних проводника, посебно се разматра утицај различитих услова и просторних конфигурација на ниво преслушавања.

1.1. Основни појмови

Електромагнетска компатибилност (ЕМС) представља способност електронског уређаја или система да правилно функционише у свом електромагнетском окружењу, без изазивања електромагнетских сметњи другим уређајима и без деградације сопствених перформанси. ЕМС се бави генерисањем, преносом и пријемом електромагнетне енергије. Ова три аспекта ЕМС проблема чине основну структуру сваког ЕМС дизајна [1].

Појам ЕМИ (енг. Electromagnetic Interference), односи се на нежељене сигнале или шуме изазване електромагнетским изворима, који нарушавају рад електронских система. ЕМИ може потицати из самог уређаја или из околних система, и у оба случаја ремети редован рад.

Када један електрични круг утиче на други, та појава се назива спрезање (енг. coupling). Ово је кључан концепт за разумијевање преслушавања. Према путањама преноса ЕМИ, методе преноса се дијеле на четири типа:

1. Спрега путем заједничке импедансе;
2. Капацитивна спрега;
3. Индуктивна спрега;
4. Радијациона спрега ;

Crosstalk (или X-talk) је феномен када сигнал на једном проводнику изазове шум на сусједном проводнику. Проводник који шаље сигнал и изазива шум назива се агресор, док се проводник који прима шум назива жртва. Постоје двије главне категорије crosstalk-a: сигнални и преклопни шум. Постоје двије локације на којима посматрамо и дефинишемо преслушавање: блиски крај (локација најближа извору) и далеки крај (локација најближа пријемнику сигнала).

Капацитивно преслушавање је појава када сигнал на једном проводнику ствара нежељени напон или струју на сусједном проводнику због међусобне капацитивности.

Када ивица сигнала агресора путује низ проводник, она убризгава струју у проводник жртве кроз међусобну капацитивност (енг. Mutual Capacitance, C_m). Струја која се убризгава дата је изразом:

$$I_c = C_m \frac{dV}{dt} \quad (1)$$

I_c - струја која се убризгава у жртву [A];
 C_m - међусобна капацитивност између агресорског и жртвеног проводника [F];
 $\frac{dV}{dt}$ - брзина промјене напона на агресорском проводнику [V/s];

Струја која се убризгава (1) види једнаку импедансу у оба правца, па половина струје иде напријед, а половина назад.

1.2. Уређаји

Уређаји коришћени током реализације експерименталних мјерења су:

1. Siglent SDG1032X

Генератор функција Siglent SDG1032X коришћен је за генерисање синусног побудног сигнала у фреквенцијском опсегу од 100 Hz до 25 MHz.

2. Дигитални осцилоскоп

Дигитални осцилоскоп Siglent SDS-1102CML+ коришћен је за посматрање и анализу сигнала током експерименталних мјерења.

3. Спектрални анализатор

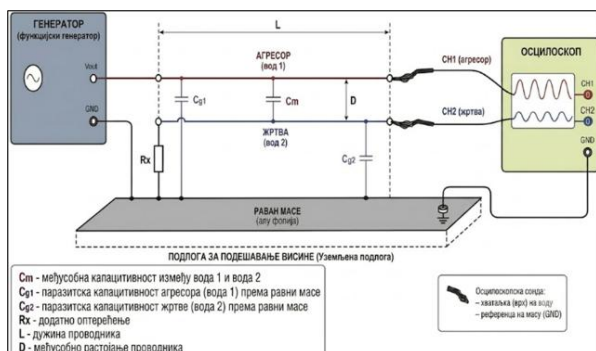
Спектрални анализатор Siglent SVA1032X са уграђеним tracking generator-ом коришћен је за анализу фреквенцијског одзива и мјерење слабљења и преслушавања.

4. Претпојачавач PA303

Претпојачавач PA303 коришћен је за појачање слабих сигнала и повећање осјетљивости мјерног система.

2. ПОСТАВКА ЕКСПЕРИМЕНТА

У овом поглављу биће приказан начин реализација експеримента (Слика 2.1). Компоненте које су биле неопходне за рад јесу бакарни проводници. Раван масе реализована је помоћу алу фолије, а као одстојник је коришћен стиропор.



Слика 2.1 Поставка експеримента

Мјерења су изведена помоћу двоканалног осцилоскопа, функцијског генератора и спектралног анализатора. Постављањем два проводника паралелно добијамо могућност за испитивање феномена преслушавања. Функцијски генератор генерише простопериодични синусни сигнал на страни агресора. Капацитивно преслушавање настаје услед нежељеног капацитивног спрежања између проводника. Капацитивности које се при томе јављају јесу међусобна капацитивност [2] и капацитивност проводника ка маси [3]. За два паралелна цилиндрична проводника, међусобна капацитивност по јединици дужине је:

$$C'_M \approx \frac{\pi \epsilon_0}{\cosh^{-1}\left(\frac{D}{2r}\right)} \left[\frac{F}{m} \right] \quad (2)$$

ϵ_0 - пермитивност вакуума ($8.854 \cdot 10^{-12} \left[\frac{F}{m} \right]$);
 π - математичка константа ($\pi \approx 3,14$);
 D - растојање између центара два проводника;
 r - полупречник проводника;

Капацитивност проводника ка маси по јединици дужине добија се формулом:

$$C'_g \approx \frac{\pi \epsilon}{\ln\left(\frac{2h}{r}\right)} \left[\frac{F}{m} \right] \quad (3)$$

ϵ - пермитивност средине између проводника и масе ($\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r$);

ϵ_0 - пермитивност вакуума ($8.854 \cdot 10^{-12} \left[\frac{F}{m} \right]$);
 ϵ_r - релативна пермитивност средине (ваздух ≈ 1);
 π - математичка константа ($\pi \approx 3,14$);
 h - висина проводника изнад масе;
 r - полупречник проводника;

Током генерисања сигнала, одзиви на проводницима, агресору и жртви, се прате и приказују на осцилоскопу помоћу сонди.

3. МЈЕРЕЊА НА НИСКИМ ФРЕКВЕНЦИЈАМА

Први случај који ће бити анализиран реализован је постављањем проводника на 3D чешљиће, са међусобним растојањем од 4mm и са одстојањем 1cm изнад масе (Слика 3.1). Полупречник проводника је 0.625 mm, а дужина је иста и износи 0.5 m.



Слика 3.1 Поставка проводника на међусобном растојању 4mm

Резултати мјерења на различитим фреквенцијама приказани су у Табели 1.

Табела 1. Приказ резултата мјерења међусобног растојања 4мм

f [kHz]	1K	5K	10K	50K	100K	500K	1M	5M	10M	15M	25M
d = 4mm											
V1 =	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	1	1	1.08	1.36	1.98	1.48
V2 =	0.0048	0.0208	0.0408	0.142	0.172	0.196	0.218	0.29	0.38	0.276	
V2/V1 [dB]	-46.1997	-33.4633	-27.6113	-16.7788	-15.114	-14.1549	-13.8993	-13.4228	-14.3376	-14.5871	

Из приказане табеле се уочава да са порастом фреквенције побудног сигнала долази до повећања преслушавања, односно смањења слабљења између агресора и жртве. Однос између напона изражен у децибелима постаје мање негативан при вишим фреквенцијама. Међусобна капацитивност између два паралелна проводника (C_m) представља реактивни елемент чија се импеданса смањује са порастом фреквенције :

$$X_c = \frac{1}{2\pi f C_m} \quad (4)$$

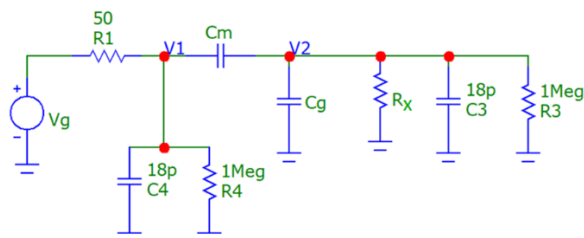
X_c — капацитивна реактанса [Ω];

f — фреквенција сигнала [Hz];

π — математичка константа ($\pi \approx 3,14$);

C_m — међусобна капацитивност између проводника [F] [4];

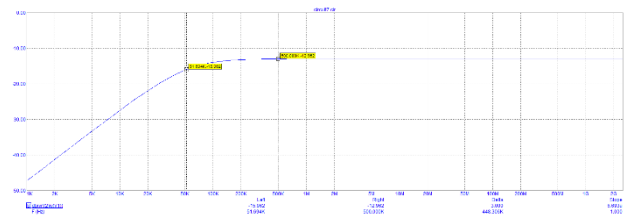
Анализом израза (4) може се закључити да је на нижим фреквенцијама капацитивна реактанса велика, због чега је капацитивна спрега слаба, што резултује израженим слабљењем сигнала. Са порастом фреквенције реактанса опада, што доводи до јачег електричног спрежања и већег преноса сметње. Теоријски осврт се поклапа са резултатима добијеним мјерењима. На *Слици 3.2* приказан је модел система са сконцентрисаним параметрима, при чему је побуда која је доведена са функцијског генератора представљена напонским извором V_g , те 50-омским оптерећењем које генератор посједује. Чворови V1 и V2 представљају проводнике са којих се хвата сигнал помоћу осцилоскопа, због чега им се додаје отпорност 1M Ω , као и капацитивност од 18pF. Поред тога, између проводника појављује се међусобна капацитивност, као и капацитивност проводника ка маси. АС анализом у Micro-Cap-у однос напона V_2/V_1 приказује се у децибелима као функција фреквенције, чиме се директно анализира фреквенцијска зависност преслушавања у колу.



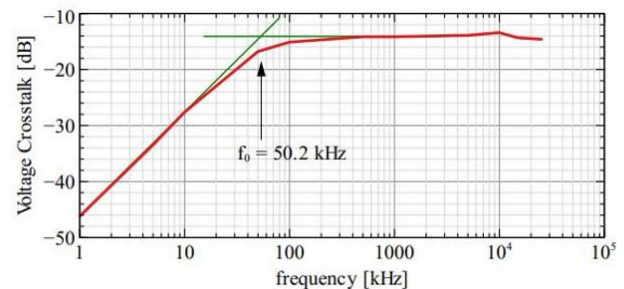
Слика 3.2 Модел испитиваног система представљен у Micro Cap-у

Овом методом лако се визуелизују промјене кроз читав фреквенцијски опсег (*Слика 3.3*), што пружа јасан увид у динамику сигнала. У области ниских фреквенција напон је директно пропорционалан фреквенцији, због чега преслушавање константно расте са нагибом од 20dB по декади. У овом опсегу отпорност има доминантан утицај, док је управо због поменуте велике капацитивне реактансе струја кроз паразитну

капацитивност ограничена, што за последицу има релативно низак индуковани напон.



Слика 3.3 Приказ карактеристике добијене у Micro Cap-у



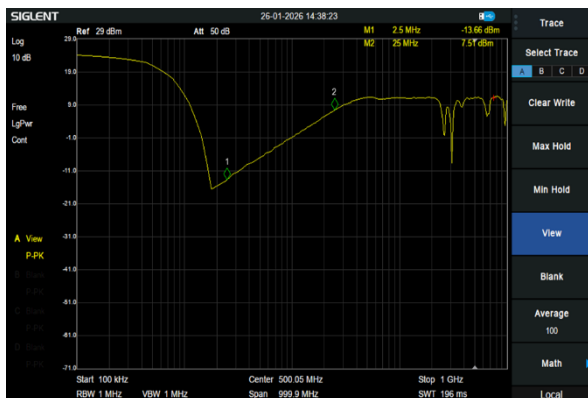
Слика 3.4 Приказ карактеристике добијене мјерењима

4. МЈЕРЕЊА НА ВИШИМ ФРЕКВЕНЦИЈАМА

Са порастом фреквенције реактанса опада (4), што доводи до јачег електричног спрежања и већег преноса сметње (приказ у *Табели 1*). Порастом фреквенције импеданса паразитних капацитивности значајно опада и почиње да се изједначава са отпорностима у колу. На довољно високим фреквенцијама коло постаје доминантно капацитивно и више не зависи од фреквенције нити отпорност има било какав даљи утицај на пренос. Систем улази у стабилizовано подручје у којем се јавља препознатљиви плато преслушавања, а максимални пренос сигнала одређен је искључиво међусобним односом капацитивности унутар посматране структуре. За визуелизацију сигнала у вишем фреквенцијском домену коришћен је спектални анализатор са уграђеним tracking generator-ом (TG) као синхронизованим извором побуде (*Слика 4.1*). Излаз TG-а повезан је на агресорски вод уз прилагођење импедансе везивањем отпорника од 50 Ω . Индуковани сигнал на воду-жртви вођен је на улаз анализатора преко претпојачавача од PA303.



Слика 4.1 Приказ експерименталне поставке са СА и PA303



Слика 4.2 Приказ карактеристике спектралног анализатора

Слика 4.2 приказује карактеристику на којој се уочава пораст од око 20dB/dec у области нижих фреквенција (маркери M1 и M2), након чега се постиже заравњени дио (плато) на вишим фреквенцијама, након којег се јављају резонантне појаве које нису предмет овог рада. Уочава се да преслушавање у нижем фреквенцијском опсегу зависи од фреквенција, након чега на вишим фреквенцијама престаје та зависност и систем улази у стабилizовано подручје. Природа карактеристике (Слика 4.2) је иста као и карактеристике добијене мјерењима на осцилоскопу приказане на Сlici 3.4.

5. ДИСКУСИЈА

Добијени резултати мјерења показују добро поклапање са теоријским моделом капацитивног преслушавања. У складу са изразом (4), повећањем фреквенције долази до смањења капацитивне реактансе, што омогућава већи проток спрегнуте струје између агресорског и жртвеног проводника. Као последица тога, са порастом фреквенције долази до повећања нивоа преслушавања, односно смањења слабљења између два проводника. Промјеном међусобног растојања проводника потврђена је зависност преслушавања од међусобне капацитивности. Према изразу (2), повећање растојања између проводника доводи до смањења капацитивности, а самим тим и до слабљења капацитивне спреге. Експериментални резултати показују да су највеће вриједности преслушавања добијене за најмање растојање проводника, док се са повећањем растојања ниво спрегнутог сигнала смањује. Утицај оптерећења проводника-жртве такође је у складу са теоријским очекивањима. Веће вриједности отпорности оптерећења доводе до појаве већег напона на проводнику жртве, јер је струја настала капацитивним спрезањем мање пригушена. Смањењем отпорности оптерећења долази до ефикаснијег одвођења спрегнуте струје, што резултује мањим нивоом преслушавања. Резултати добијени симулацијом модела са сконцентрисаним параметрима у MicroCap-у показују исто фреквенцијско понашање као и експериментална мјерења. Уочена појава платоа на вишим фреквенцијама одговара услову када капацитивна реактанса постаје знатно мања од отпорности оптерећења, па пренос сигнала више није ограничен само отпорним елементима кола.

6. ЗАКЉУЧАК

У овом раду је кроз теоријску, симулациону и експерименталну анализу успјешно верификован модел капацитивног преслушавања између паралелних проводника, при чему је потврђен карактеристичан раст преносног односа од 20dB по декади на нижим фреквенцијама. Мјерења су доказала да се ниво сметњи на воду-жртви ефикасно сузбија повећањем међусобног растојања (смањењем капацитивности C_m) и смањењем отпора оптерећења. Добијени резултати и методологија пружају директне практичне смјернице за оптимизацију дизајна штампаних плоча (PCB), унапрјеђење сигналног интегритета и превентивну дијагностику сметњи у области електромагнетне компатибилности (EMC).

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Chayton R. Paul „Introduction to electromagnetic compatibility 2nd edition”, Wiley-Interscience, 2006.
- [2] Dr Ben Yelverton , „Exact capacitance of parallel wires, valid for any separation”, приступљено децембра 2025, <https://www.youtube.com/watch?v=X84MVLe3ip0>
- [3] S. W. Ellingson, „7.1: Parallel Wire Transmission Line“, Electromagnetics II, Virginia Tech Libraries' Open Education Initiative, приступљено децембра 2025, [https://phys.libretexts.org/Bookshelves/Electricity_and_Magnetism/Electromagnetics_II_\(Ellingson\)/07%3A_A_Transmission_Lines_Redux/7.01%3A_Parallel_Wire_Transmission_Line](https://phys.libretexts.org/Bookshelves/Electricity_and_Magnetism/Electromagnetics_II_(Ellingson)/07%3A_A_Transmission_Lines_Redux/7.01%3A_Parallel_Wire_Transmission_Line)
- [4] J. C. Rawlins, „Basic AC Circuits, Second Edition“, Newnes, 2000.

Кратка биографија



Дања Горонић рођена 24.04.2001. године у Приједору. Завршила је Гимназију „Свети Сава“ у Приједору. Основне академске студије на Факултету техничких наука из области Електронике, енергетике и телекомуникација – смјер Примењена електроника завршава 2024. године. Тренутно је студент мастер академских студија на Факултету техничких наука из области Примењене електронике. Контакт: danjagoroni@gmail.com