

**Мерна метода:**

Метода за одређивање комплексне пермеабилности феритних материјала у фреквенцијском опсегу од 300 kHz до 1 GHz

**Руководилац пројекта:** проф. др Владимир Срдих

**Одговорно лице:** Нелу Блаж

**Аутори:** Нелу Блаж, Андреа Марић, Љиљана Живанов,  
Факултет техничких наука (ФТН), Нови Сад;

Горан Радосављевић,

Институт за сензорске и актуаторске системе, Беч, Аустрија

**Развијено:** у оквиру пројекта технолошког развоја ИИИ - 45021

**Година:** 2013.

**Примена:** 01.10.2013.

**Кратак опис**

Познавање магнетске пермеабилности феритних материјала је веома важно приликом дизајнирања и одабира материјала за израду електронских компоненти. Индуктивност индуктора са феритним језгром не зависи само од броја или геометрије навојака већ и од пермеабилности феритног језгра. Постоје различите методе за одређивање пермеабилности. Најчешће коришћена метода за одређивање пермеабилности материјала јесте трансмисиона/рефлексиона метода. Поред наведене методе постоје такође и метода са еквивалентним колом као и резонантна метода.

За одређивање комплексне пермеабилности у фреквенцијском опсегу од 300 kHz до 1 GHz н биће коришћена рефлексиона мерна метода која укључује мерење импедансе затвореног, краткоспојеног коаксијалног држача узорка употребом векторског анализатора мреже Agilent E5071B. Као краткоспојени коаксијални држач се користи комерцијално доступан држач ознаке HP 04191-85302 произвођача Agilent. Овај држач има карактеристичну импедансу од 50  $\Omega$  као и цео мерни систем како не би дошло до нежељене рефлексије на спојевима између држача и коаксијалног кабла или улазног порта инструмента и коаксијалног кабла.

Феритни мерни узорак мора бити изведен у облику торуса минималних димензија: унутрашњег пречника 3,6 mm, спољашњег пречника 6,7 mm и висине 1 mm. Ове минималне димензије су задате како би испитивани феритни узорак одговарао димензијама коаксијалног држача.

Горе наведеном мерном методом мере се С параметри коаксијалног држача са и без торусног узорка. Добијени С параметри се аутоматски уносе у развијени програмски алат за прорачун комплексне пермеабилности. Програмски алат је развијен у програмског окружењу *Matlab*-а и као резултат прорачуна даје графички и приказ табеларни приказ комплексне пермеабилности испитиваног.

**Техничке карактеристике:**

Мерни систем, који се састоји од векторског анализатора мрежа, краткоспојеног коаксијалног држача узорка, спрежног високофреквентног коаксијалног кабла и развијени програмски алат омогућавају брзо и прецизно одређивање комплексне пермеабилности феритних материјала..

**Техничке могућности:**

Приказани мерни систем омогућава одређивање комплексне пермеабилности феритних материјала на основу измерених С. Мерења је могуће спровести како на собној тако и на повишеним температурама, у оквиру фреквентног опсега од 300 kHz до 1 GHz.

**Реализатори:**

ФТН, Нови Сад

**Корисници:**

Факултет техничких наука, Нови Сад, Институт за сензорске и актуаторске системе, Беч, Аустрија, Институт за мултидисциплинарна истраживања, Београд, ИРИТЕЛ А.Д., Београд.

**Подтип решења:**

M85 - Нова мерна метода.

## Увод

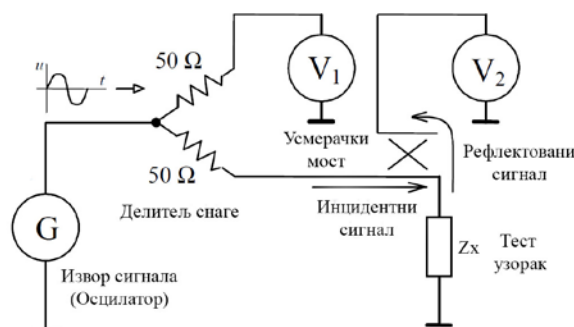
Ферити су хемијска једињења која се састоје од смеша оксида метала од којих је основна компонента гвожђе оксид ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ). Имају многобројне примене као што су израда сталних магнета, феритних језгара за трансформаторе, рачунарских меморија за масовно складиштење података итд. Ферити су као и већина керамичких материјала тврди и крти. Што се тиче њихових магнетних особина феритни материјали се деле на меке и тврде феритне материјале. У коју групу ће који феритни материјал да припадне пре свега зависи од вредности коерцитивног поља ( $H_c$ ) тако да материјали који имају мало коерцитивно поље спадају у магнетски меке а са високим коерцитивним пољем у магнетски тврде феритне материјале.

Постоје више врста магнетских материјала, али су само феромагнетски и феримагнетски материјали од важности у технологији, јер се лако могу намагнетисати релативно slabим пољем. Ферит је у суштини керамички материјал који у себи комбинује отпорност изолаторских материјала са релативно великом пермеабилношћу. Легуре ферита које се највише користе су манган-цинк (у даљем тексту MnZn) и никл-цинк (у даљем тексту NiZn). Ови материјали имају велику унутрашњу отпорност и способност да се брзо намагнетишу. MnZn се користи на нижим фреквенцијама док се NiZn користи на вишим фреквенцијама. У овом истраживању биће карактерисани материјали на бази обе легуре.

Познавање магнетске пермеабилности феритних материјала је веома важно приликом дизајнирања и одабира материјала за израду електронских компоненти. Индуктивност индуктора са феритним језгром не зависи само од броја или геометрије навојака већ и од пермеабилности феритног језгра. Постоје различите методе за одређивање пермеабилности. Најчешће коришћена метода за одређивање пермеабилности материјала јесте трансмисиона/рефлексиона метода. Поред наведене методе постоје такође и метода са еквивалентним колом као и резонантна метода.

## Теоријски модел

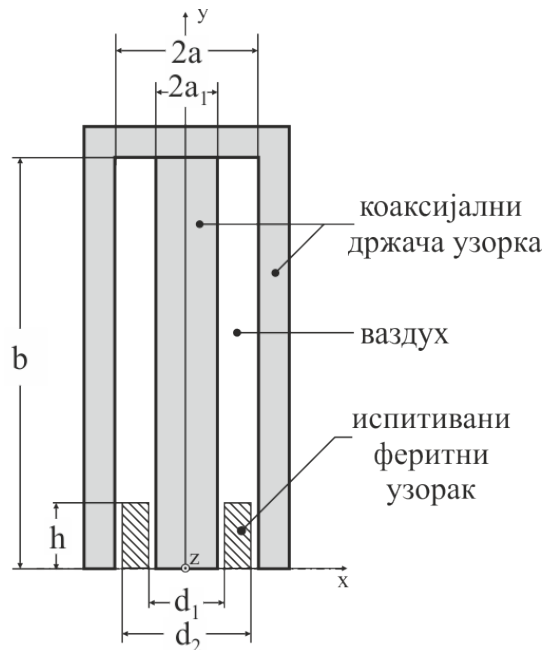
За одређивање комплексне пермеабилности на вишим учестаностима биће коришћена мерна метода, која укључује мерење импедансе затвореног, краткоспојеног коаксијалног држача узорака употребом векторског анализатора мреже. Мерни инструмент коришћен у овом делу истраживања је векторски анализатор мрежа.



Слика 1. Принцип рада векторског анализатора мрежа.

Мерењем се добија комплексни коефицијент рефлексије  $S_{11} = Re(S_{11}) + j Im(S_{11})$  који представља однос рефлектованог и инцидентног сигнала. Усмерачки мост или спрежник се користе за детектовање рефлектованог сигнала и његово мерење. Инструмент поседује тест прикључак за узорак, који се испитује и производи излазни сигнал пропорционалан са комплексним коефицијентом рефлексије. Захваљући томе могуће је мерити рефлектовани коефицијент испитиваног узорка у широком опсегу учестаности. Векторски опсег референтног и тест канала детектује оба, реални и имагинарни део вектора, који се подудара са компонентама  $Re(S_{11})$  и  $Im(S_{11})$ . Мерена вредност коефицијента рефлексије може се аутоматски конвертовати у одговарајућу вредност импедансе у мереном опсегу учестаности. У опсегу високих учестаности користи се коаксијални држач (са APC-7 коаксијалним конектором), па се пермеабилност мереног узорка на високим учестаностима добија мерењем разлике улазних импеданси коаксијалног држача са и без узорка.

На Слици 2 приказана је скица попречног пресека држача са постављеним узорком.



Слика 2. Скица попречног пресека држача са постављеним феритним узорком.

Карактеристична импеданса ( $Z_0$ ) свих делова мерног систем инструмента, кабла, адаптера и примењеног држача мора бити иста не би дошло до нежељене рефлексије и она износи  $50 \Omega$ .

Кратко спојено коло је изабрано јер оно проузрокује максимално магнетско поље и минимално електрично поље у унутрашњости држача, што чини ову технику (кратко спојеног држача узорка) веома погодном за одређивање магнетских особина тест узорка као што је пермеабилност.

Пошто коаксијални држач чини један навој око феритног језгра комплексни магнетни флуks мереног кола, укључујући и феритно језгро, може се представити као:

$$\tilde{\Phi} = \iint_S \vec{B} \cdot d\vec{S} = \int_0^a \int_0^b \frac{\mu_0 \mu_r I}{2\pi x} dx dy. \quad (1)$$

Поделом површине попречног пресека држача узорка у једначини (1), где је  $\vec{B}$  комплексни вектор интензитета магнетног флуksа,  $\mu_0$  пермеабилност вакуума,  $\mu_r$  релативна пермеабилност узорка, а  $I$  комплексна вредност временски зависне струје  $i(t)$  добија се једначина

$$\tilde{\Phi} = \int_{\frac{d_2}{2}}^a \int_0^b \frac{\mu_0 I}{2\pi x} dx dy + \int_{\frac{d_1}{2}}^{\frac{d_2}{2}} \int_0^h \frac{\mu_0 \tilde{\mu}_r I}{2\pi x} dx dy + \int_{\frac{d_1}{2}}^{\frac{d_2}{2}} \int_h^b \frac{\mu_0 I}{2\pi x} dx dy + \int_0^{\frac{d_1}{2}} \int_0^b \frac{\mu_0 I}{2\pi x} dx dy + \int_0^a \int_0^b \frac{\mu_0 I}{2\pi x} dx dy \quad (2)$$

Решавањем једначине (2) добија се да је магнетски флуks мереног кола:

$$\tilde{\Phi} = \frac{\mu_0 I}{2\pi} \left\{ (\tilde{\mu}_r - 1)h \cdot \ln \left( \frac{d_2}{d_1} \right) + b \cdot \ln \left( \frac{a}{a_1} \right) \right\}, \quad (3)$$

а да се комплексна сусцептибилност тест узорка се може изразити као

$$\tilde{\chi} = \frac{2\pi (\tilde{\Phi} - \tilde{\Phi}_0)}{hI\mu_0 \cdot \ln \left( \frac{d_2}{d_1} \right)}, \quad (4)$$

где је  $\tilde{\Phi}_0$  је магнетски флуks држача када феритно језгро није присутно (држач без узорка), дефинисано једначином:

$$\tilde{\Phi}_0 = \frac{b\mu_0 I}{2\pi} \ln \left( \frac{a}{a_1} \right). \quad (5)$$

Еквивалентна шема мереног узорка може се представити еквивалентним колом приказаним на Слици 2. Мерена комплексна импеданса  $\tilde{Z}$  еквивалентног електричног кола држача са феритним узорком је дефинисана као:

$$\tilde{Z} = R + j\omega L = \frac{j\omega\tilde{\Phi}}{I}, \quad (6)$$

па се флуksеви  $\tilde{\Phi}$  и  $\tilde{\Phi}_0$  у једначини (4) могу заменити одговарајућим комплексним импедансама: импеданса држача са узорком  $\tilde{Z}$  и импеданса држача без узорка  $\tilde{Z}_0$ . Овом заменом добија се коначни образац за комплексну пермеабилност испитиваног узорка и она гласи:

$$\tilde{\mu}_r = 1 + \tilde{\chi} = 1 + \frac{(\tilde{Z} - \tilde{Z}_0)}{jh \cdot \mu_0 \cdot f \cdot \ln \left( \frac{d_2}{d_1} \right)} \quad (7)$$

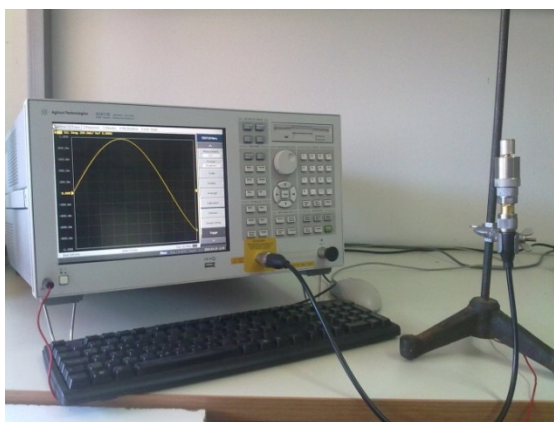
где су:  $d_1$  - унутрашњи пречник торусног узорка,  $d_2$  - спољашњи пречник торусног узорка,  $h$  - висина узорка, а  $f$  је учестаност примењеног наизменичног електромагнетског поља. Комплексна релативна пермеабилност се стога може израчунати као разлика између импедансе држача оптерећеног узорком и импедансе празног држача.

Користећи једначину (8) могуће је одредити вредности за улазну импедансу коаксијалног држача ( $Z_{ul}$ ) из измерених  $S_{11}$  параметара за случај са и без испитиваног феритног узорка.

$$\tilde{Z}_{ul} = Z_0 \frac{1 + S_{11}}{1 - S_{11}}. \quad (8)$$

## Мерна метода и експериментални резултати

Мерна поставка система за одређивање комплексне пермеабилности феритних материјала приказана је на Слици 3 а). Систем се састоји од векторског анализатора мрежа Agilent Technology E5071В на који је преко коаксијалног кабла и адаптера N-тип/APC 7 прикључени на краткоспојени коаксијални држач. Као краткоспојени коаксијални држач коришћен је стандардни, комерцијално доступан држач ознаке HP 04191-85302 произвођача Agilent, Слици 3. б).



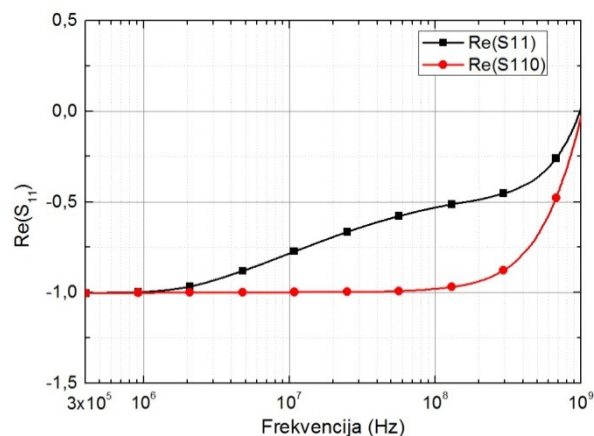
а)



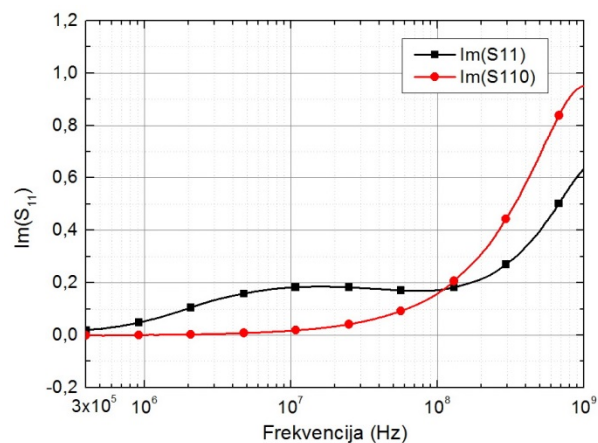
б)

**Слика 3.** Мерна поставка за одређивање комплексне пермеабилности на вишим фреквенцијама а) и примењени коаксијални држач б).

Мерни опсег у коме су вршена мерења је опсегу учестаности од 300 kHz до 1 GHz. Вршена су једнопортна мерења да би се одредили реални и имагинарни део  $S_{11}$  параметара. Да би се добили што прецизнији резултати мерења су вршена за дати фреквентни опсег у 1601 тачци са фактором усредњавања 100. Сва мерења су извршена на собној температури (25 °C). Графички приказ измерених  $S_{11}$  параметара са и без феритног узорка  $S_{110}$  за феритни материјал ознаке ESL 40012 приказан је на Слици 4. На Слика 6. дати су графици измерених  $S_{11}$  параметара са и без феритног узорка  $S_{110}$  за феритни материјал ознаке ESL 40011.



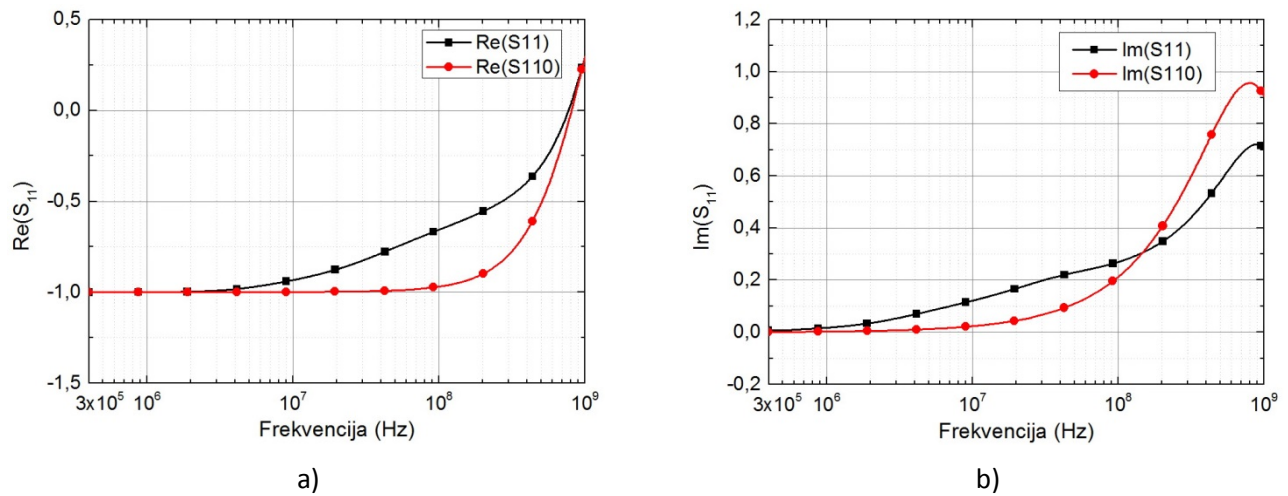
а)



б)

**Слика 4.** Графички приказ измереног реалног а) и имагинарног б) дела  $S_{11}$  параметара са и без феритног узорка  $S_{110}$  за ESL 40012.

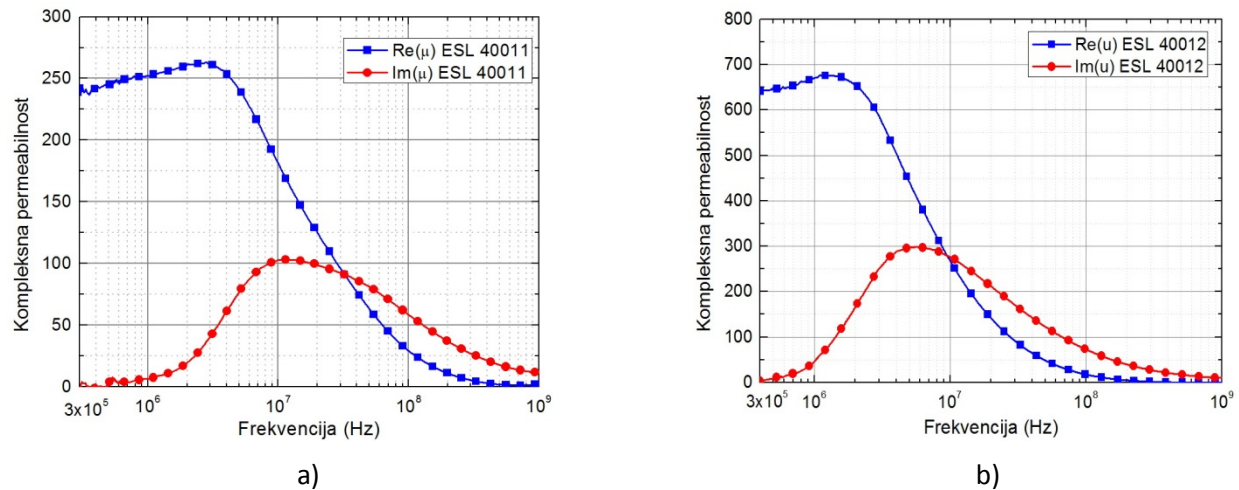
Ради бржег и ефикаснијег прорачуна комплексне пермеабилности из измерених  $S_{11}$  параметара развијен је посебан програмски алат у програмском пакету *Matlab*. Он има могућности аутоматизованог уношење измерених  $S_{11}$  параметара уз помоћ којих прорачунава



**Слика 5.** Графички приказ измереног реалног а) и имажинарног б) дела  $S_{11}$  параметара са и без феритног узорка  $S_{110}$  за ESL 40011.

реални и имагинарни део комплексне пермеабилности. Као опције постоје графички приказ прорачунатих вредности као и њихово табеларно уписивање у фајл.

Прорачунате вредности за реални и имагинарни део комплексне пермеабилности за LTCC феритни материјал ESL 40011 приказане су на Слици 6. а) а за ESL 40012 на Слици 6. б)



**Слика 6.** Графички приказ прорачунате комплексне пермеабилности за ESL 40011 а) и графички приказ прорачунате комплексне пермеабилности за ESL 40012 б).

На графика приказаног на Слици 6. а) се може уочити да реални део комплексне пермеабилности има тенденцију пораста до 27,6 MHz где достиже вредност од 262,9 након које са даљим порастом фреквенције реални део комплексне пермеабилности почиње да опада да би на учестаности од 1 GHz имала вредност од 2,54.

На истом графику се може видети да имагинарни део комплексне пермеабилности достиже свој максимум од 103 на 11,6 MHz чега почиње да опада да би на учестаности од 1 GHz има вредност 11.

Са Сlike 6. а) се може видети да реални део комплексне пермеабилности има тенденцију пораста до 1,2 MHz где достиже вредност од 676. Након максимума реални део комплексне пермеабилности почиње да опада да би на учестаности од 1 GHz имала вредност од само 0,007.

Имагинарни део комплексне пермеабилности достиже свој максимум на 5,6 MHz и он износи 299 након чега почиње да опада да би на учестаности од 1 GHz има вредност 9,85.

Поређењем вредности добијених за комплексну пермеабилност може се закључити да материјал ESL 40012 има већу вредност реалног дела пермеабилности од ESL 40011. Гледано са становишта фреквенције феритни метријал ознаке ESL 40011 упркос мањој вредности за пермеабилност може се користити на већим учестаностима од феритног материјала ESL 40012.

### Могућности представљене мерне методе

У овом технолошком решењу је приказана је метода за одређивање комплексне пермеабилности феритних материјала. Новина се огледа у карактеризацији комерцијално доступних или новопроизведених феритних материјала помоћу векторског анализатора мрежа и краткоспојеног коаксијалног држача узорка. Овакав начин карактеризације је омогућен је преко развијеног теоријског модел који је имплементиран у развијени програмски алат. Овај програмски алат омогућава брзо и прецизно одређивање комплексне пермеабилности у фреквенцијском опсегу од 300 kHz до 1 GHz. Од излазних података програмски алат даје зависност комплексне пермеабилности од промене фреквенције у графичком и табеларном облику.

Феритни мерни узорак мора бити изведен у облику торуса минималних димензија: унутрашњег пречника 3,6 mm, спољашњег пречника 6,7 mm и висине 1 mm. Ове минималне димензије су задате како би испитивани феритни узорак одговарао димензијама коаксијалног држача.

Приказана метода карактеризације је тестирана на комерцијално доступним LTCC материјалима компаније *ElectroSience laboratory* ESL 40011 и ESL 40012. За ова два, од сада неокарактерисана материјала, одређена је комплексна пермеабилност предложеном методом на собној температури. Добијени резултати су у сагласности са оквирним вредностима које је произвођач презентовао у техничкој документацији феритних материјала.

***Нова метода за одређивање комплексне пермеабилности феритних материјала у фреквенцијском опсегу од 300 kHz до 1 GHz развијена је на Факултету техничких наука у Новом Саду, у оквиру текућег пројекта бр. ИИИ-45021 код Министарства за науку и технолошки развој Републике Србије.***

***Штампано –2014.***