

ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ – ВАРНА

инж. Теодора Пламенова Тодорова

Електрически свойства на Mn-Zn феритни
материали

АВТОРЕФЕРАТ

на дисертация за получаване на образователна и научна
степен „доктор“

по докторска програма *5.2.4. Електронизация*
към професионално направление *5.2. Електротехника, електроника и*
автоматика

Научен ръководител: проф. д-р инж. Венцислав Цеков Вълчев

Рецензенти:

1.

2.

Варна, 2018г.

Дисертационният труд е обсъден на 15.06.2018 г. в катедра „Електронна Техника и Микроелектроника“ и насочен за защита.

Докторантът работи в катедра „Електронна Техника и Микроелектроника“.

Автор: инж. Теодора Пламенова Тодорова

Заглавие: Електрически свойства на Mn-Zn феритни материали

ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ – ВАРНА

инж. Теодора Пламенова Тодорова

Електрически свойства на Mn-Zn феритни
материали

АВТОРЕФЕРАТ

на дисертация за получаване на образователна и
научна степен „ДОКТОР“

Варна, 2018г.

Дисертационният труд съдържа 131 страници, включително 46 фигури и 11 таблици, оформени в 4 (четири) глави, общи изводи и списък на използваната литература от 123 заглавия, от които 4 на кирилица и 119 на латиница.

**Защитата на дисертационния труд ще се състои наг.
отч. в
на открито заседание на жури, сформирано със заповед на
Ректора №...../.....г.**

Материалите по защитата (дисертацията, рецензиите и становищата) са на разположение на интересуващите се в Докторантския център, стая 318 НУК.

ХАРАКТЕРИСТИКА НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

Актуалност на проблема

Загубите на мощност в Mn-Zn феритни сърцевини все още не са напълно обяснени. Изследователите продължават да търсят по-добро описание на техните механизми, за да се постигнат по-надеждни оценка и прогнозиране на влиянието им върху електрическите вериги както във физически, така и в поведенчески аспект. Един от източниците на тези загуби са загубите от вихрови токове. Техният принос нараства с нарастване на работната честота, което от своя страна е тенденция в съвременните импулсни преобразователни устройства. Загубите от вихрови токове в сърцевината на магнитния компонент зависят от електрическите ѝ свойства, но производителите на търговски налични Mn-Zn феритни материали не предоставят такава информация за разнообразието от марки ферити.

Проблем

За да се добие информация за честотно зависимите електрически свойства на Mn-Zn феритен материал е необходимо да се извършат конкретни измервания. Тези измервания обаче са затруднени от наличието на феномена *размерен резонанс*. При неговата поява, проявените от тестовия образец свойства са ефективни (привидни), а не присъщи.

Цел и задачи на изследването

Изхождайки от ограниченото познание и липсата на данни относно честотно зависимите електрически свойства на Mn-Zn феритни материали, необходими за анализа на загубите в такива сърцевини, пред дисертацията се поставя следната **основна цел**:

Изследване и моделиране на импедансни характеристики на различни по форма и размер Mn-Zn феритни образци, които да способстват определянето на присъщите електрически свойства на тези материали и изолирането на влиянието на феномена *размерен резонанс*.

За постигането на тази цел се поставят следните **задачи**:

1. Разработване и реализация на измервателен комплекс, базиран на конвенционални лабораторни уреди, който да осигурява възможност за широкочестотно измерване на импеданса на различни по форма и размер Mn-Zn феритни образци при различни техни собствени температури.
2. Подбор на опитни образци и измерване импедансните характеристики на последните в широк честотен диапазон.
3. Създаване и верификация на универсална еквивалентна заместваща схема на Mn-Zn феритни образци на база измерванията от предходната задача, за моделиране на присъщите електрически свойства на тестваните материали.

4. Създаване и верификация на еквивалентна заместваща схема за моделиране на импедансни характеристики на Mn-Zn феритни образци, повлияни от проявено магнитно поле, т.е. от възникнал размерен резонанс.

5. Търсене на признаци в резултатите от импедансни измервания за директното идентифициране на честотите, при които размерният резонанс вече е възникнал по време на измерванията.

6. Анализирание влиянието на използваната ширина на честотния диапазон, „отрязан“ от данните от импедансни измервания и служещ като входни данни за моделирането, върху самото моделиране на присъщите електрически свойства на тестваните материали.

Обект и предмет на изследването

Обект на изследването представляват присъщите електрически свойства на Mn-Zn феритни материали.

Предмет на изследването е разпознаването на присъщите честотно зависими електрически свойства на Mn-Zn феритни материали и тяхното моделиране. Това включва разпознаване на появил се размерен резонанс при импедансни измервания и изолиране на влиянието му при моделиране на присъщите свойства. В търсене на по-широка приложимост на моделирането и облекчаване на интерпретирането му на по-късен етап, стремежът е то да се реализира чрез електрически еквивалентни заместващи схеми, базирани на физиката на разглеждания материал.

Методи на изследване

Основните методи на изследването в дисертацията, с конкретни примери на прилагането им, включват:

измерване: измерване импедансите на Mn-Zn феритни образци.

моделиране:

- стандартна заместваща схема на диелектрик за директно определяне на проявени електрически свойства;
- създаване на по-сложни еквивалентни заместващи схеми, отразяващи по-точно естеството на разглеждания материал или възникнали полеви взаимодействия в него, за моделиране на присъщи и привидни електрически свойства.

анализ:

- **при моделирането** – модели, базирани на разграничаване на отделните градивни единици на веществото при създаване на еквивалентна заместваща схема на образец. При това става възможно разграничаване на елементи в заместващите схеми при моделирането, които са с друг, външен за разглежданите образци, произход (паразитни елементи);
- **при интерпретацията на резултатите** – поотделно разглеждане на евентуални ефекти свързани с дълбочина на скин слоя и такива,

свързани с дължината на вълната в материала. Моделно изграждане на хипотетичен случай за отсъствие на иначе наблюдавано и моделирано явление и изучаване същността на последното въз основа сравняване на двата резултата.

синтез: обединяване на модели на по-тънки образци при моделиране на по-големи образци; обединяване влиянето на електрическите и магнитните свойства в една обща заместваща схема при моделиране на привидни електрически свойства (импедансни характеристики повлияни от размерния резонанс).

Място на изследване

Изследванията са проведени на следните места:

- „Лаборатория по Силова Електроника“ към катедра ”Електронна Техника и Микроелектроника“ при Технически Университет – Варна, гр. Варна, България в рамките на редовна докторантура;
- „Лаборатория по Електрическа Енергия (EELab)“ към катедра „Електрическа Енергия, Метали, Механични Конструкции и Системи“ при Университет Гент, гр. Гент, Белгия в рамките на стажантска докторантска мобилност по европейска програма Еразъм+;
- Лаборатория към катедра „Електрически апарати“ при Технически Университет – София, гр.София, България в рамките на проект ПДЗ при ФНИ на ТУ-Варна, 2017г.

Научна новост на изследването

В резултат на проведените изследвания, в дистерационния труд е създадена еквивалентна заместваща схема за моделиране на присъщите електрически свойства на Mn-Zn ферити, която се смята за универсална за тези материали. На база създадената схема е създадена и друга заместваща схема, чрез която едновременно се моделират както електрическите, така и магнитните свойства на Mn-Zn феритни образци. Това е подход за разглеждане на размерния резонанс от гледната точка на електрическите вериги. При използване на втората схема е установена закономерност даваща връзка между най-малкия размер на контактите повърхности на образците, дължината на вълната във феритния материал и появата на рамерния резонанс.

Получени са честотно зависимите електрически свойства на широко употребяван в практиката Mn-Zn феритен материал при типични за силовата електроника работни температури. Извлечените свойства сочат, че за сърцевини, изработени от една и съща марка ферит, могат да се наблюдават значителни разлики (100%) в специфичната електрическа проводимост.

Установени са признаци в резултатите от импедансни измервания на Mn-Zn феритни образци, чрез които директно може да се идентифицира приблизителната честотна точка на възникнал размерен резонанс.

Практическа ценност на изследването

Предложената измервателна постановка е изградена от конвенционални лабораторни уреди, което я прави по-достъпна в сравнение със специализирана апаратура за провеждане на импедансни измервания. Онагледено е влиянието на формата на образците върху измерването на присъщите електрически свойства на раглежданите материали, като е дадена информация и за осигуряването на електрически контакт между образеца и опитната постановка.

Чрез създадената електрическа схема за моделиране на присъщи електрически свойства, последните са налични във форма, която е непрекъсната функция на честотата. Това значително облекчава работата, когато се прави анализ на честотно зависими величини и процеси. Предложените схеми могат да се използват за моделиране на други марки Mn-Zn феритни материали, за анализ електрическите свойства на отделните градивни единици на веществото (металните зърна и изолацията между тях), за оценка на загуби от вихрови токове в магнитни сърцевини. В допълнение, получените зависимости на свойствата на изследвания ферит могат да се използват като входни данни при симулации на физично базирани процеси.

Установените признаци в резултатите от импедансни измервания дават възможност за директно разпознаване на възникнал размерен резонанс, което облекчава работата на изследователя. Например, те дават информация за последната честотна точка от данните от измерванията, която трябва да се има предвид, когато се подхожда към моделиране на само присъщи електрически свойства.

Апробация на изследването

В основната си част, изследванията от дисертацията са докладвани на конференции и в статии в журнали, както следва:

- 1 (една) статия в международен журнал с импакт фактор $IF=7.151$ (*IEEE Transactions on Power Electronics*), рефериран в база данни *Scopus*;
- 1 (една) статия в международен журнал с импакт фактор $IF=0.542$ (*Journal of Electrical Engineering*; очаква се одобрение), рефериран в база данни *Scopus*;
- 1 (един) доклад на национален форум (форум „Електроника“, София);
- 5 (пет) доклада на национални и международни форуми, реферирани в база данни *Scopus* (*JEMS*, Glasgow; *ET*, Созопол; *SIELA*, Бургас).

Обобщено, 7 (седем) научни публикации в издания, реферирани в база данни *Scopus*, две от които в списания с импакт фактор, и 1 (една) публикация в рамките на национална конференция.

СЪДЪРЖАНИЕ НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

Тук се прави обзор на съдържанието на дисертационния труд по глави. Номерацията на фигурите и формулите, дадени в текста тук, съответства на номерацията им в текста на дисертацията.

Глава I Същност и приложения на Mn-Zn феритни материали. Актуални проблеми при употребата им в контекста на силовата електроника.

В първа глава от дисертацията са разгледани основни аспекти на Mn-Zn феритни материали и тяхната употреба в силовата електроника. След обзор на химическия състав и производствения процес, са разгледани проблеми, свързани с проектирането на високочестотни магнитни компоненти. Основен проблем е определянето на загубите в сърцевината, които макар и да са обект на дългогодишен изследователски интерес, все още не са напълно обяснени.

Един от източниците на загуби в Mn-Zn ферити са загубите от вихрови токове. За тяхната оценка е необходима информация за честотните зависимости на реалната диелектрична проницаемост и специфичната електрическа проводимост на материала. Производителите на Mn-Zn ферити обикновено не предоставят такава информация. Това налага конкретни измервания, които от своя страна са възпрепятствани от явлението *размерен резонанс*.

Явлението е докладвано за първи път от Brockman et al. през 1950 г. Поради огромната диелектрична проницаемост ($\sim 10^5$) и голямата магнитна проницаемост ($\sim 10^3$) на Mn-Zn ферити, при дадена честота в образеца съществуват както електрическо, така и магнитно поле, независимо от природата на първичното поле. При това, когато се измерва импеданс на Mn-Zn феритен образец, след една честота, той е обусловен както от електрическите, така и от магнитните свойства на материала. Прилагайки уравненията на Максвел, Brockman et al. разработват теория на наблюдаваните размерни ефекти, базирана на геометрията на безкрайно дълга пластина. Те показват, че при импедансни измервания на тънки проби, появата на размерния резонанс се придвижва към по-високи честоти.

Въпреки значимостта на откритието, електрическите свойства на Mn-Zn ферити остават negliжирани през годините. Това отбелязват Skutt et al. през 90-те години на миналия век, когато правят обзор на техники за измерване на магнитните и електрическите свойства на Mn-Zn ферити. За потискане влиянието на размерния резонанс, при измерване на електрическите свойства те използват тънък образец, като допускат равномерно разпределение на електрическото поле в него за целия изследван честотен диапазон.

През първото десетилетие на този век се забелязва по-засилен интерес към взаимодействието на електрическите и магнитните свойства на Mn-Zn ферити

при съответни измервания. Използвайки уравнения на Максвел, Keradec et al. дават формулировка за определяне на комплексната магнитна проницаемост от измервания върху тороид, при вземане предвид комплексната диелектрична проницаемост на образеца. Друг колектив от автори, R. Huang, D. Zhang, C. F. Foo, посвещават няколко публикации на темата, които отново се базират на законите на Максвел, формулирани за конкретни геометрии образци. При тези подходи, за изследвания честотен диапазон се извършват две поредици измервания – на магнитните и на електрическите свойства на един образец или само на електрическите свойства на два образеца. След това за всяка честотна точка от измерването се решават системи от две или четири уравнения за определяне на присъщите комплексни магнитна и диелектрична проницаемости.

В обобщение, при измерване електрическите свойства на Mn-Zn ферити, в долкадваните методи или се приема равномерно разпределение на електрическото поле в образеца или резултатите от измерванията подлежат на последваща обработка. Обща специфика на всички тези подходи е, че данните за получените електрически свойства идват като вектори от дискретни стойности. От друга страна, приложната електроника се характеризира с анализи и модели, базирани на теорията за електрическите вериги, при което е по-удобно да се разполага и работи с електрическа еквивалентна заместваща схема на обекта на интерес.

Глава II Постановка за измерване на импедансни характеристики на Mn-Zn феритни образци чрез използване на конвенционални лабораторни уреди

Тази глава е посветена на решаването на първите две задачи, поставени пред дисертационния труд.

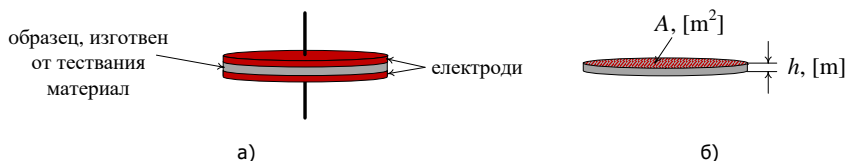
Първоначално е разгледан принципът, заложен в метода на плоския кондензатор, за измерване на електрически свойства на твърди материали. На Фиг. II-1 са дадени принципната постановка (диелектричен материал, представен като плосък кондензатор) и релевантните геометрични размери на тествания образец, необходими при определяне на електрическите свойства чрез прилагане на метода.

След измерване на импеданса на образеца, той се преобразува в комплексна проводимост, чиито реална и имагинерна части се използват за определяне на специфичната електропроводимост

$$(II.9) \quad \sigma = Y' h / A$$

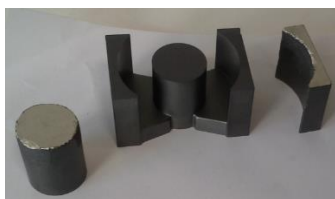
и реална диелектрична проницаемост

$$(II.10) \quad \varepsilon_r' = Y'' h / (\omega \varepsilon_0 A).$$



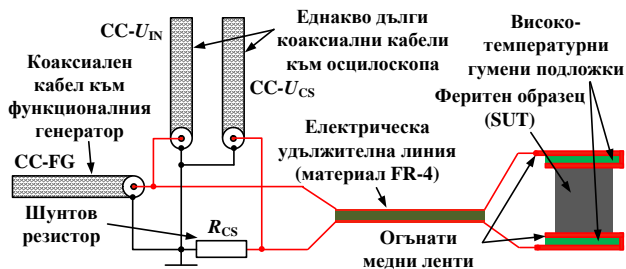
Фиг. II-1 Метод на плоския кондензатор: а) принципна постановка; б) релевантни геометрични размери на образца.

След това са представени опитните образци. Използвани са 4 (четири) образца - средно и крайно рамена, изрязани от сърцевина PQ 40/40 и още една двойка средно и крайно рамена изрязани от PQ 50/50 сърцевина. И двете изходни сърцевини са изработени от материал N87. Геометрията на образците е показана на Фиг. II-2. Тъй като контактните повърхности на страничните рамена се характеризират с участъци с малък размер, от тях се очаква да проявят присъщи електрически свойства в широк честотен диапазон. От средните рамена, които са с относително голям диаметър, се очаква да покажат ясно влиянието на размерния резонанс. Контактните повърхности на образците са метализирани със сребърна проводима боя.



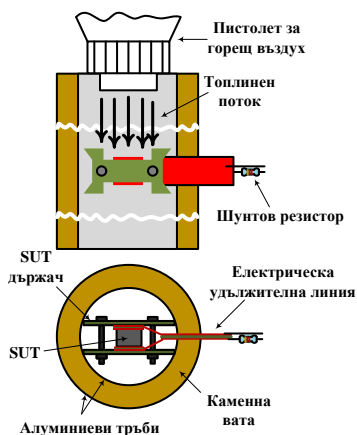
Фиг. II-2 Опитни образци и съответна изходна сърцевина: в средата – изходна сърцевина; ляво – образец тип „средно рамо“; дясно- образец тип „странично рамо“.

След обосновка избора на образците е разгледана реализираната измервателна постановка. Физическият ѝ изглед е даден на Фиг. II-4. Изследването се извършва в диапазона $133 \text{ Hz} \div 50 \text{ MHz}$.



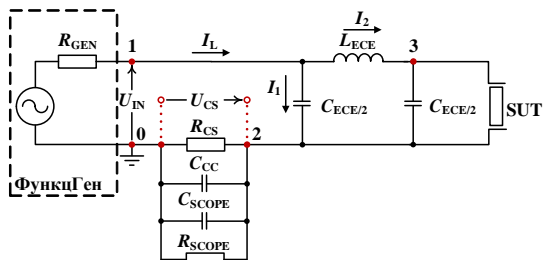
Фиг. II-4 Физически изглед на реализираната измервателна постановка.

За осигуряване на различни собствени температури на изследваните образци е изградена система за тяхното нагряване, показана на Фиг. П-5. Изследваните температурни режими са съответно 25, 85, 100 и 120 °С.



Фиг. П-5 Система за нагряване на опитните образци.

Определянето на стойността на изследвания импеданс за всяка честотна точка на измерването се основава на електрическа еквивалентна заместваща схема на измервателната постановка, която е представена на Фиг. П-6.



Фиг. П-6 Еквивалентна заместваща схема на реализираната измервателна постановка.

Чрез схемата от Фиг. П-6, за търсения импеданс се извежда изразът

$$(П.21) \quad Z_{SUT} = 1 / [(1 / (U_{32} / I_2)) - (1 / Z_C)],$$

където всички променливи представляват комплексни величини и $Z_C = X_C = 1 / (j\omega C_{ECE/2})$.

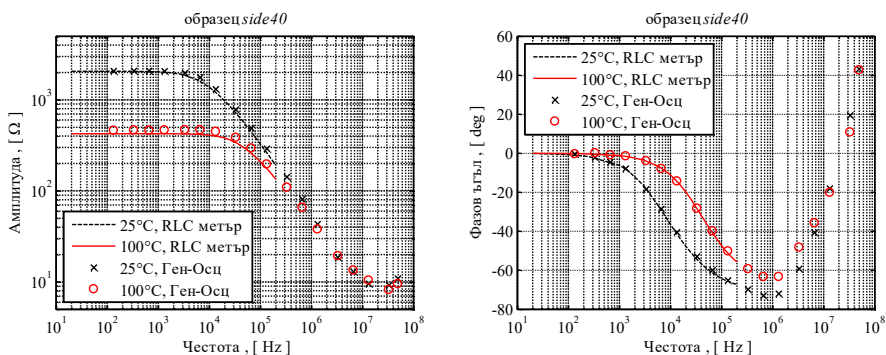
Исходните параметри за решаване на (П.21) са амплитудите на двете наблюдавани напрежения, съответно $|U_{IN}|$ и $|U_{CS}|$, и дефазирването между тях $\Delta\varphi$. Те се получават чрез синтезиран Matlab код. В скрипта на кода се импортира .csv файл, генериран от осцилоскопа, който носи информация за наблюдаваните

сигнали във функция от времето. Изходните данни се определят чрез прилагане на бързо преобразуване на Фурие на двете наблюдавани напрежения.

След описанието на опитната постановка, работата ѝ е верифицирана чрез измерването на прецизен кондензатор. При верифицирането е идентифицирано наличие на внесени паразитни последователни индуктивност (от порядъка на nH) и съпротивление (приблизително 1Ω). Като се имат предвид тези особености, е заключено, че измервателната постановка успешно може да се приложи за измерване импедансите на феритните образци.

В края на главата са дадени резултатите от измерванията на образците. В резултатите, отнасящи до крайните рамена не се забелязва типично резонансно поведение за честоти под 10 MHz . При средните рамена, напротив, при около 1 MHz се наблюдава силно изразен резонанс, който предполага въздействие на размерен ефект. Въз основа на това е решено, че за модлиране на присъщи електрически свойства ще се използват резултатите от крайните рамена.

В една последна част на главата е дадено сравнение на горепосочените резултати с резултати, постигнати чрез използването на RLC метър. Пример за това е даден на Фиг. П-20.

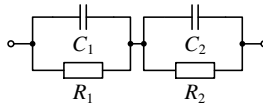


Фиг. П-20 Сравнение на резултати от измерване импеданса на образец *side40* чрез използването на настолен RLC метър (линии) и предложения подход за измерване (маркери).

Глава III Моделиране на електрическите свойства на Mn-Zn феритни материали

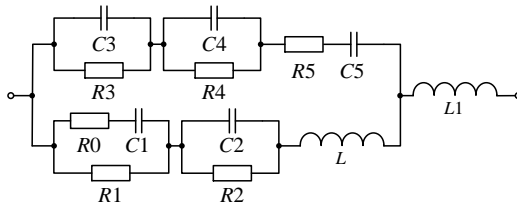
В тази глава се решават трета и четвърта задачи, поставени пред дисертацията. Измерените в предходната глава характеристики, тук подлежат на моделиране чрез използването на еквивалентни заместващи схеми.

Първоначално е разгледана известна към момента еквивалентна заместваща схема за моделиране електрическите свойства на Ni-Zn и Mn-Zn ферити. Схемата е дадена на Фиг. III-2. Обяснението е, че едната RC двойка отразява приноса на металните зърна в структурата на ферита, а другата – приноса на изолацията между зърната.



Фиг. III-2 Еквивалентна заместваща схема за моделиране импеданса на образец, изготвен от феритен материал.

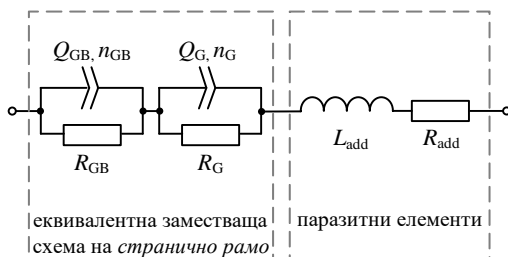
Тъй като беше установено, че тази схема не успява да моделира добре измерените в предходната глава характеристики, беше потърсена друга схема. Новата схема е показана на Фиг. III-3, в която индуктивността L присъства само в случаите на средните рамена; в случаите на страничните рамена тя се заменя с късо съединение. Тази схема се характеризира с много параметри. В допълнение, различните параметри, свързани с даден образец при различните температури, заемат различни стойности, което я прави трудно приложима. Поради това отново е пристъпено към търсенето на друга заместваща схема.



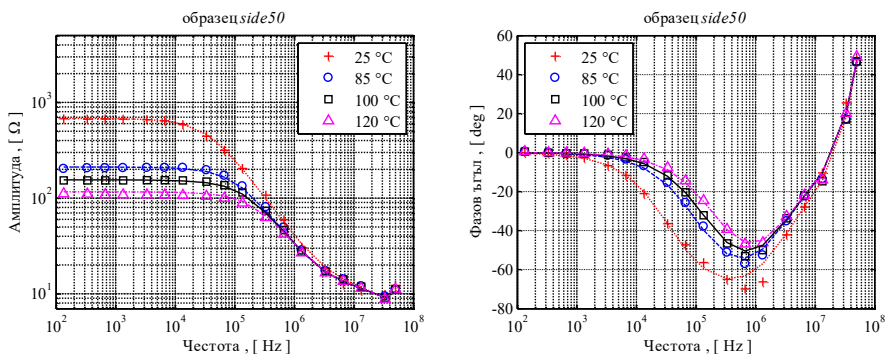
Фиг. III-3 Синтезирана еквивалентна заместваща схема с константни елементи, моделираща получените импедансни характеристики на изследваните феритни образци.

В резултат на търсенето беше установено, че тестваните образци проявяват импеданс с постоянна фаза. В предложената преди $R||C + R||C$ верига, на мястото на кондензаторите се появяват елементи с постоянна фаза CPE (Constant Phase Element). CPE елементът се характеризира с два параметъра – Q , [$s^n/(\Omega \cdot \text{cm}^2)$] и n , $[-]$ – като импедансът му има вида $Z_Q = 1/[(j\omega)^n Q]$, където j е имагинерната единица, а ω е кръговата честота. Новополучената схема за моделиране импедансите на страничните рамена е показана на Фиг. III-5. Лявата заградена област от схемата на фиг. III-5 е еквивалентната заместваща схема на странично рамо, а дясната част съдържа паразитни елементи, възникващи от несъвършенството на измервателната постановка.

Сравнение на резултати от измерването с тези от моделирането чрез заместващата схема, представена на фиг. III-5, относно образец *side50* е дадено на Фиг. III-7.

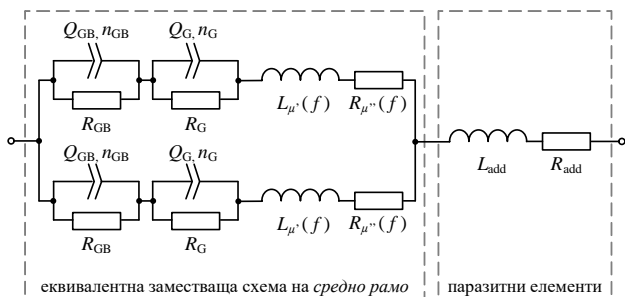


Фиг. III-5 Електрическа еквивалентна заместваща схема на измерените импеданси, отнасящи се до страничните рамена (опитни образци *side40* и *side50*).



Фиг. III-7 Модул и фаза на импедансите, отнасящи се до опитен образец *side50* при независима променлива – собствената температура на образца: *маркери* – резултати от измервания; *линии* – зависимости, моделирани чрез еквивалентната заместваща схема, дадена на Фиг. III-5, и съответните стойности, докладвани в Таблица III-2.

За моделирането на импедансните характеристики на средните рамена е решено да се използват вече наличните модели на крайните рамена. Изтъкват се три причини. Първо, двойката опитни образци *side40* и *mid40*, както и двойката *side50* и *mid50*, са изрязани от една и съща изходна сърцевина, при което до голяма степен е гарантирано, че образците от всяка от двете двойки се характеризират с едни и същи материални свойства. Второ, напречната площ на средното рамо на всяка от изходните сърцевини е приблизително двойно по-голяма от тази на съответното странично рамо. В такъв случай, при свързването в паралел на две идентични заместващи схеми на странично рамо, би трябвало да се получи модел на съответното средно рамо. Трето, изхождайки от първата причина, при използване моделите на страничните рамена за синтезиране еквивалентната схема на средните рамена би се доказала коректността на самите модели на страничните рамена.



Фиг. III-11 Електрическа еквивалентна заместваща схема, отнасяща се до измерените импеданси на средните рамена (тестови образци *mid40* и *mid50*). Лявата част на изобразената схема представлява еквивалентната заместваща схема на средно рамо, докато дясната част съдържа паразитни елементи, дължащи се на несвършенството на измервателната постановка. Стойностите на елементите R_{GB} , Q_{GB} , n_{GB} , R_G , Q_G , n_G относно всяко от средните рамена са тези, отговарящи на съответното странично рамо (например, за да се моделира импеданса на образца *mid40*, трябва да се използват съответните стойности, отнасящи се до образца *side40*).

Синтезираната заместваща схема относно средните рамена е показана на Фиг. III-11. В допълнение към модела на странично рамо, тя включва и допълнителните елементи $L_{\mu}'(f)$ и $R_{\mu}''(f)$. Тези елементи се използват в търсене на описание на силно изразения в резултатите от съответните измервания резонанс при около 1 MHz (вж. Фиг. III-13 по-долу), за който се предполага, че е размерния резонанс. При резонанса, поведението на характеристиките преминава от капацитивно в индуктивно. Основавайки се на това наблюдение и знаейки, че капацитивното поведение резултира от електрическите материални свойства, хипотезата е, че индуктивното поведение резултира от магнитните материални свойства (това следва и от идеята за размерния резонанс). Предположението, което се прави тук е, че резонансният ефект би следвало да е зависим от – респективно, описуем чрез отчитането на – вътрешната индуктивност на образците, която за цилиндричен обект се определя чрез израза

$$(III.5) \quad L_{int} = \frac{\mu_r \mu_0 h}{8\pi}.$$

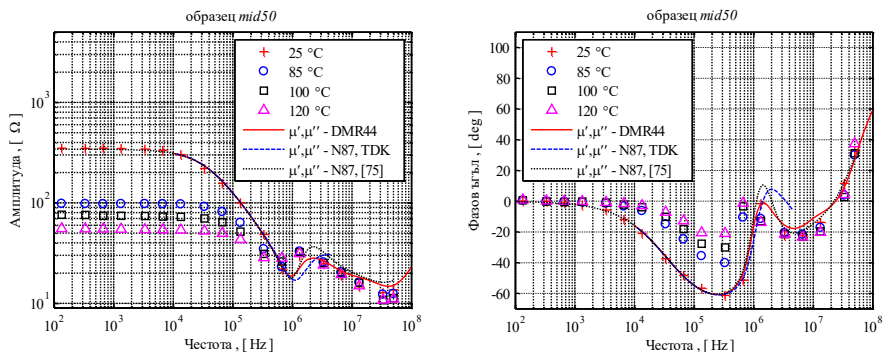
При заместване на μ_r с честотно зависимата последователна комплексна магнитна проницаемост $\dot{\mu}'_s(f) = \mu'_s(f) - j\mu''_s(f)$ на ферита, изразът (III.5) води до вътрешна индуктивност със загуби. Това е верига, изградена от последователно свързани индуктивност

$$(III.6) \quad L_{\mu}'(f) = \frac{\mu_0 h}{8\pi} \mu'_s(f)$$

и съпротивление

$$(III.7) \quad R_{\mu}''(f) = \frac{\mu_0 h}{8\pi} \omega \mu''_s(f).$$

На Фиг. III-13 са показани резултати за образец *mid50*, получени чрез измерване, и съответните моделирани зависимости при използването на схемата от Фиг. III-11. Припокриването при ниските честоти сочи, че в този диапазон присъщите електрически свойства са коректно определени чрез заместващите схеми на страничните рамена. Разгледани са три различни случая на комплексна магнитна проницаемост. При това се потвърждава предположението, че вътрешната индуктивност може да обясни резонансното поведение при около 1 MHz, като доброто припокриване зависи от конкретната стойност на магнитната проницаемост.



Фиг. III-13 Модул и фаза на импедансите, отнасящи се до опитен образец *mid50*: *маркери* – резултати от измервания; *линии* – зависимости, моделирани чрез еквивалентната заместваща схема, дадена на Фиг. III 11, и съответните стойности, докладвани в Таблица III 2 и Таблица III 3.

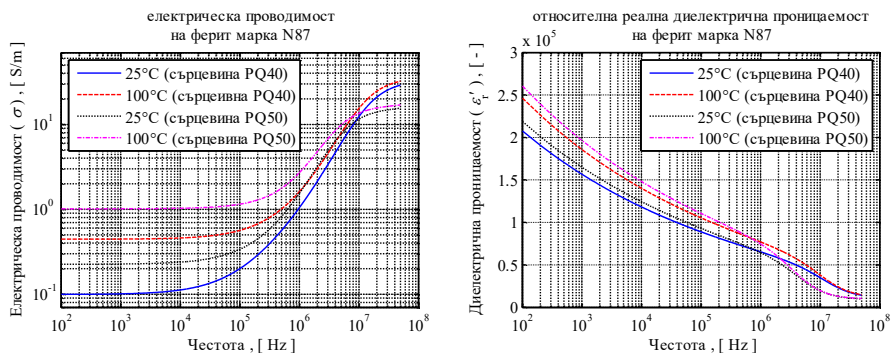
След като са създадени модели на всички измерени образци е пристъпено към определяне на електрическите свойства. Тъй като в измерените характеристики на крайните рамена не се забелязва типичен резонанс при честоти под 10 MHz, тези резултати са база за извличането на свойствата. Влиянето на паразитните елементи е изключено от схемата. Така, позовавайки се на схемата от Фиг. III-5 и израза (II.9), специфичната електропроводимост се определя чрез

$$(III.8) \quad \sigma = \operatorname{Re} \left(\frac{1}{\frac{1}{R_{GB} + Q_{GB}(j\omega)^{n_{GB}}} + \frac{1}{R_G + Q_G(j\omega)^{n_G}}} \right) \cdot h / A,$$

а чрез използване на (II.10), изразът за реалната диелектрична проницаемост има вида

$$(III.9) \quad \varepsilon_r' = \operatorname{Im} \left(\frac{1}{\frac{1}{R_{GB} + Q_{GB}(j\omega)^{n_{GB}}} + \frac{1}{R_G + Q_G(j\omega)^{n_G}}} \right) \cdot h / (\omega \varepsilon_0 A).$$

Извлечените свойства са показани на Фиг. III-14. Нискочестотната специфична електропроводимост от 0.1 S/m на ферита от изходна сърцевина PQ 40, напълно съвпада с постояннотокото специфично съпротивление от 10 Ω·m на N87, така както е специфицирано от производителя. Огромната реална диелектрична проникваемост е типична за Mn-Zn феритни материали и е в съответствие с данни, налични в литературата.



Фиг. III-14 Честотни зависимости на специфичната електропроводимост и реалната диелектрична проникваемост на феритен материал N87 при независим параметър–собствената температура на материала. Зависимостите на електрическите свойства са извлечени от получения модел на страничните рамена, представен във Фиг. III-5 и съответните стойности, дадени в Таблица II-2 и Таблица III-2.

След като са получени електрическите свойства е пристъпено към определяне дълбочината на скин-слоя δ и дължината на електромагнитната вълна λ в материалите, при използване на изразите

$$(III.10) \quad \delta = 1 / \sqrt{\frac{\mu \epsilon \omega^2}{2} \cdot \left[\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{\epsilon \omega} \right)^2} - 1 \right]}$$

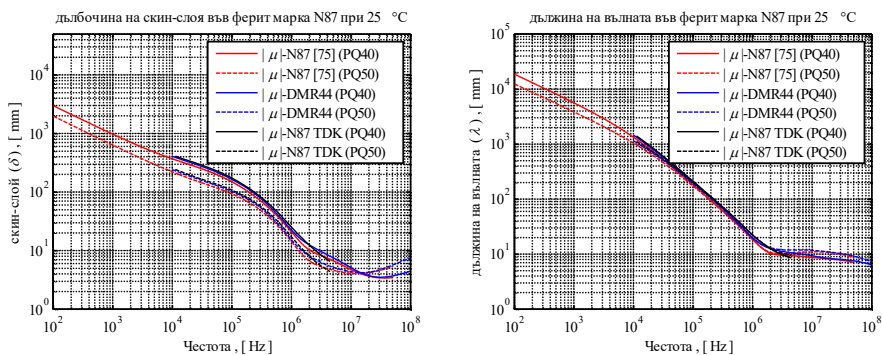
и

$$(III.11) \quad \lambda = 2\pi / \sqrt{\frac{\mu \epsilon \omega^2}{2} \cdot \left[\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{\epsilon \omega} \right)^2} + 1 \right]}.$$

При решаване на (III.10) и (III.11) се използват моделираните реална диелектрична проникваемост и специфична електропроводимост и абсолютната стойност на комплексната магнитната проникваемост за трите разгледани случая. Получените зависимости са показани на Фиг. III- 15.

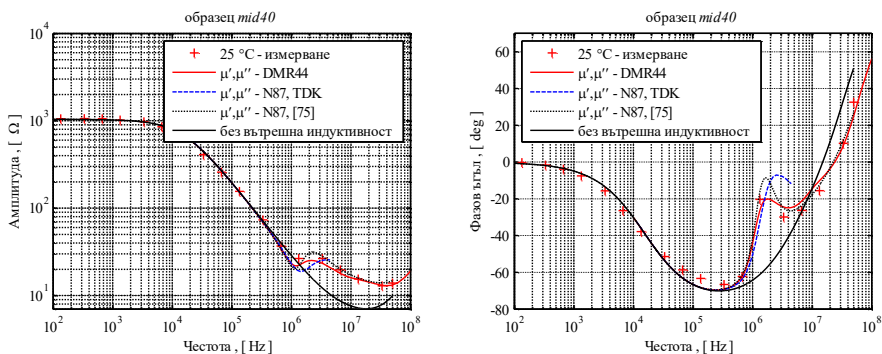
При анализа първо се обръща внимание на ефекти асоциирани с дълбочина на скин-слоя. Разглеждането сочи, че такива не би трябвало да възникват в крайните рамена, а в средните рамена се очаква да се появят при честоти над 6 MHz за образец *mid40* и над 1 MHz за образец *mid50*. Получените от

измерванията резултати обаче, показват резонансно поведение, появяващо се при много по-ниски честоти, а съответните модели потвърждават влияние от налично в образците магнитно поле.



Фиг. III-15 Дълбочина на скин-слоя и дължина на вълната във феритен материал N87, получени чрез извлечените електрически свойства и трите различни случая на комплексната магнитна проникваемост, изобразени на Фиг. III-10.

За да се продължи с анализа, вниманието се насочва към хипотетичен случай, при който липсва влияние на вътрешната индуктивност със загуби в характеристиките на средните рамена. Това се постига като в съответната заместваща схема (вж. Фиг. III-11), елементите $L_{\mu'}(f)$ и $R_{\mu''}(f)$ се заменят с късо съединение (паразитните елементи L_{add} и R_{add} продължават да са част от модела). Получените резултати относно образец *mid40* са дадени на Фиг. III- 16.



Фиг. III-16 Абсолютна стойност и фазов ъгъл на импедансните характеристики, отнасящи се до образец *mid40*: *маркери* – резултати от измервания; *линии* – зависимости, моделирани чрез заместващата схема от Фиг. III-11 и съответните стойности, дадени в Таблица III-2 и Таблица III-3. Линиите „без вътрешна индуктивност“ отразяват случая, в който $L_{\mu'}(f)+R_{\mu''}(f)$ звената в модела на средните рамена във Фиг. III-11 не участват в заместващата схема (заменени са с късо съединение).

Сравнявайки резултатите с и без влияние на вътрешната индуктивност, е отчетено, че размерния резонанс започва да се проявява при около 200 kHz за

образец *mid50* и 300 kHz при измерването на образец *mid40*. Обръщайки внимание на дължината на вълната в същите честотни точки е идентифицирана зависимост, че най-малкият размер на напречното сечение на тестван образец трябва да бъде 4,5 пъти по-малък от дължината на вълната в материала, за да не може магнитното поле да се проявява по време на измервания на електрическите свойства. Отнасяйки тази закономерност към извлечените електрически свойства и ширините на контактните повърхности на крайните рамена е заключено, че по отношение на материала от сърцевина PQ 40, извлечените свойства са присъщите такива за честоти до 1 MHz, а за материала от сърцевина PQ 50 – за честоти до 700 kHz. Тези лимити сочат диапазона на валидност на синтезираните схеми на крайните рамена що се отнася до присъщи електрически свойства на раглежданите ферити.

След като е определена валидността на извлечените присъщи електрически свойства, в заключението към тази глава е направен коментар на самите свойства. При честоти над 50 kHz се наблюдава значително нарастване в специфичната електропроводимост. При сравняване на получените зависимости на двата различни материала, се виждат значителни разлики, а именно че материалът на сърцевината PQ 50 притежава двойно по-голяма проводимост от тази на материала от PQ 40 сърцевината, и, макар и по-слабо изразено, по-голяма реална диелектрична проницаемост. Тъй като се знае, че влиянието на размерния резонанс е изолирано, може да се заключи, че двата материала наистина притежават различни електрически свойства – 5 % разлика в реалната диелектрична проницаемост при ниските честоти и 100 % разлика в съответната специфична електропроводимост.

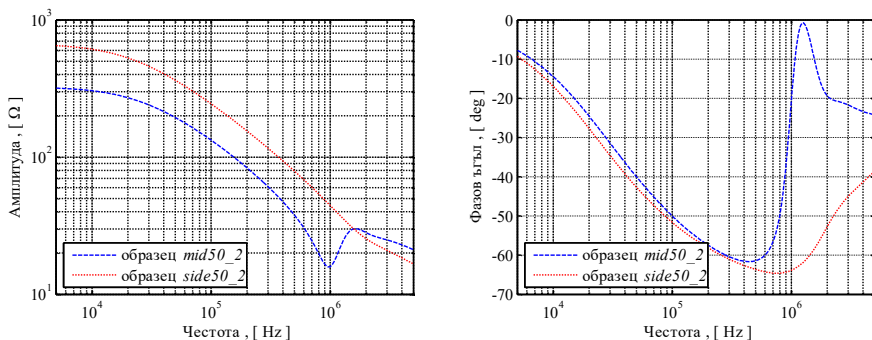
В литературата е забелязано, че импедансът с постоянна фаза, проявен от изследваните в тази дисертация Mn-Zn феритни материали, също се наблюдава и в други видове феритни материали. Използваната $R_{GB} // Q_{GB} + R_G // Q_G$ структура е подходяща за моделиране на електрическите свойства на разгледаните материали, но не е подходяща за SPICE-базирани симулатори на електрически вериги, при които параметрите трябва да се преобразуват от честотната област във времевата област. За тази цел трябва да се направи приближение, което често включва приравняването на една $R // Q$ двойка към няколко RC двойки.

Глава IV Моделиране на електрическите свойства на Mn-Zn феритни материали, при вземане предвид появата на размерния резонанс

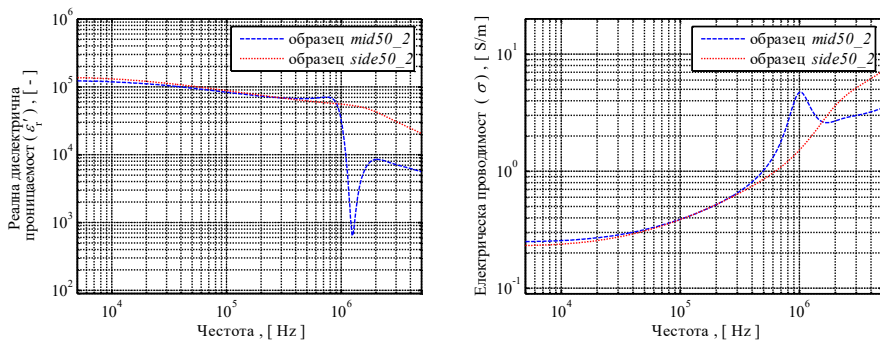
В тази последна глава са решени и последните две задачи, поставени пред дисертационния труд. За тяхното решаване са проведени измервания на нови четири образца – средно и крайно рамена изрязани от сърцевини PQ50, материал N87 (образци *side50_2* и *mid50_2*); една плочка с 2 mm ширина на контактната повърхност, материал N87 (образец *plate N87*); една плочка с 3 mm

ширина на контактната повърхност, материал N97 (образец *plate N97*). Измерванията са осъществени с импедансен анализатор.

Първо се търсят признаци в резултатите от измервания, които сочат кои честоти са повлияни от феномена на размерния резонанс. За целта се сравняват резултатите от измерванията на образци *side50_2* и *mid50_2*. Измерените импедансни характеристики са дадени на Фиг. IV-1, а съответните електрически свойства на Фиг. IV-2. За двата образца е прието, че се характеризират с еднакви свойства. При сравняване на резултатите става ясно, че в модула на импеданса на *mid50_2* отново отчетливо се откроява размерен резонанс, докато при *side50_2* това отново не е така. Също така, при сравняването на електрическите свойства, може да се определи до коя честота тези, проявени от цилиндричния образец, са присъщи, но за крайното рамо това не може да се прецени.



Фиг. IV-1 Резултати от измерване импеданса на опитни образци *side50_2* и *mid50_2*: абсолютна стойност и фазов ъгъл.



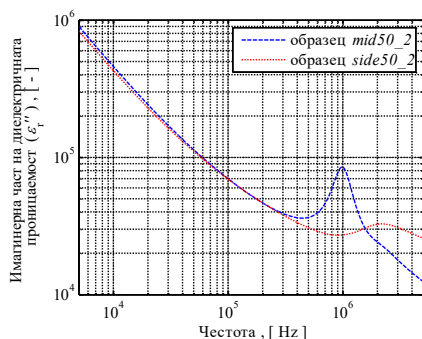
Фиг. IV-2 Електрически свойства, извлечени директно от резултатите от импедансните измервания на образци *side50_2* и *mid50_2*, представени във Фиг. IV-1.

За да се обосноват и дефинират признаци, сочещи честотен диапазон, в който размерният резонанс вече е възникнал, следва разглеждане на честотната

характеристика на имагинерната част на комплексната относителна диелектрична проникваемост. Тя е свързана със специфичната електрическа проводимост чрез зависимостта

$$(IV.1) \quad \varepsilon_r'' = \sigma / (\omega \varepsilon_0).$$

Получените резултати са показани на Фиг. IV-3. При сравнение на характеристиките, извлечени от двата образца, отново може директно да се назове честотата от 300 kHz, отвъд която свойствата проявени от *mid50_2* вече са привидни, а не присъщи. Освен това, в тази крива се забелязва, че в честотния диапазон 300 ÷ 600 kHz се наблюдава локален минимум. В характеристиката на *side50_2*, макар и по-слабо проявено, отново се забелязва същото поведение, само че при по-високи честоти. Този локален минимум се дефинира като признак за възникнал размерен резонанс. Използвайки този признак, по отношение на *side50_2* може да се заключи, че отвъд честотата на локалния минимум при 850 kHz, проявените от образца електрически свойства вече са повлияни от размерния резонанс. В предходната глава е демонстрирано, че в друг образец с идентична геометрия и от една и съща доставка, размерният резонанс се появява при честота от около 700 kHz.

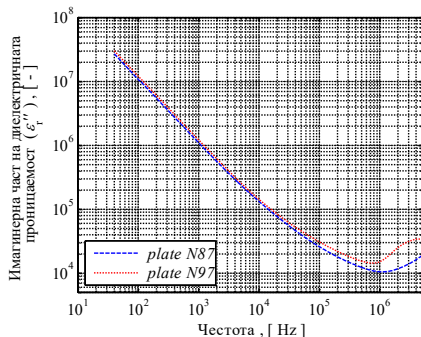


Фиг. IV-3 Имагинерна част на комплексната относителна диелектрична проникваемост, извлечена от резултатите от импедансните измервания на образци *side50_2* и *mid50_2*, представени във Фиг. IV-1.

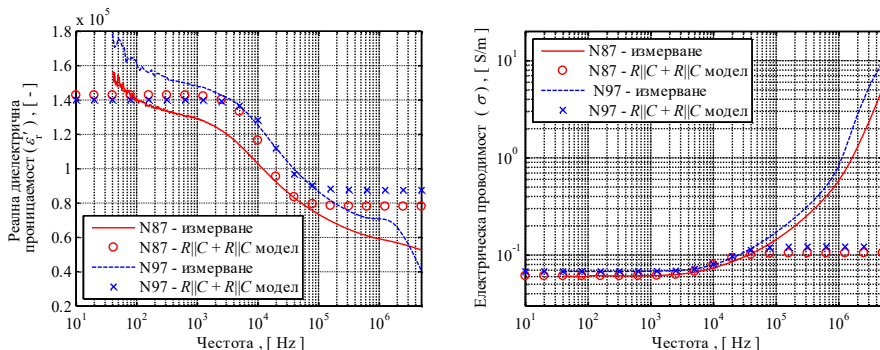
Като алтернатива, ако се обърне внимание на фазовата характеристика във Фиг. IV-1, ще се види, че тази информация, е налична и там. Приблизителната честота на вече възникнал размерен резонанс е индикирана от първата чупка в честотната характеристика на фазовия ъгъл, която оттам насетне започва движение в обратната посока.

След като са установени признаци в измерванията за възникнал размерен резонанс, знанието за тях е използвано при моделиране на импедансните характеристики на образците *plate N87* и *plate N97*. Въз основа на Фиг. IV- 5 е прието че в *plate N87* размерният ефект се появява при честота от 1 MHz, а в

plate N97- при 700 kHz. Така, тези точки са последните за честотния диапазон, който след това се използва като входни данни за моделиране на изследваните импеданси. За самото моделиране са приложени два вида еквивалентни заместващи схеми. Първият модел е предложената преди $R//C+R//C$ структура (вж. Фиг. III-2), а вторият модел– предложената в тази дисертация схема с елементи с постоянна фаза (верига от типа $R//Q+R//Q$, Фиг. III-5, лява област).



Фиг. IV-5 Имагинерна част на комплексната относителна диелектрична проникваемост, извлечена от резултатите от импедансните измервания на опитни образци *plate N87* и *plate N97*, представени във Фиг. IV-4.

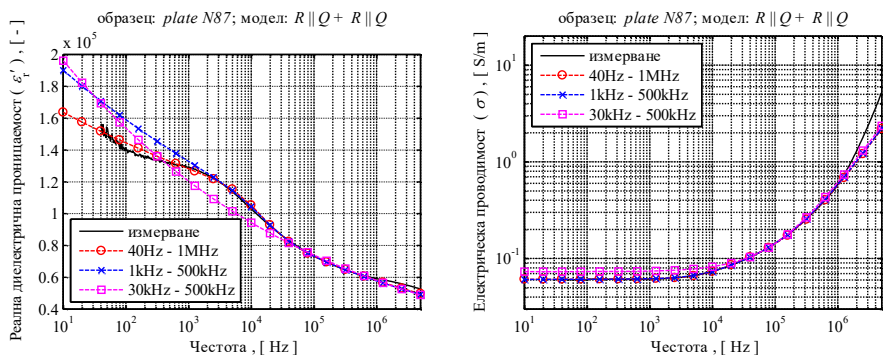


Фиг. IV-6 Електрически свойства на Mn-Zn феритни материали N87 и N97, извлечени от измерванията на опитни образци *plate N87* и *plate N97* и съответните свойства, моделирани чрез $R//C + R//C$ заместваща схема (стойности на съответните елементи са дадени в Таблица IV-2).

Сравнение на моделираните електрически свойства чрез $R//C+R//C$ структурата с тези, директно извлечени от измерванията, е дадено на Фиг. IV-6. От графиките се вижда, че моделираните зависимости се характеризират с две стабилни нива при ниски и високи честоти. Експерименталните спектри обаче, показват непрекъснатата промяна на електрическите свойства в зависимост от честотата, което демонстрира, че $R//C+R//C$ заместващата схема не успява да

моделира правилно импедансите на тестваните образци в изследваните честотни диапазони.

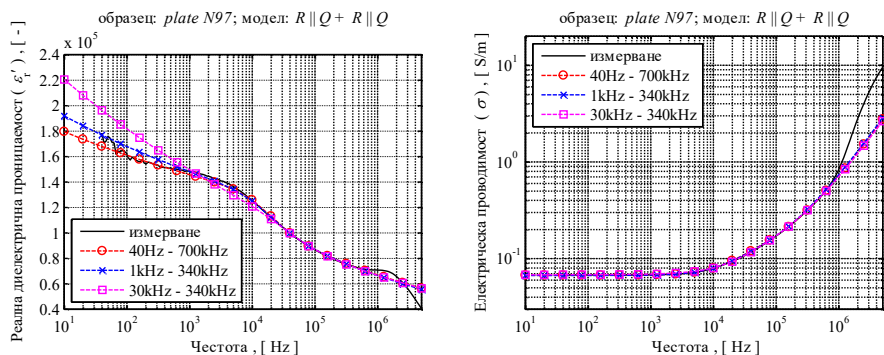
На следващ етап е извършено моделиране с $R//Q+R//Q$ верига. За да се изследва влиянието на ширината на честотния диапазон, който се „отрязва“ от данните от измерването и се използва като входни данни за моделирането, са използвани различни по обхват честотни диапазони: (1) честотен диапазон с долна гранична честота – най-ниската честотна точка на измерването $f_{meas,min}$ и с горна гранична честота – определената от предходната стъпка честота на възникнал размерен резонанс f_{DR} ($f_{meas,min} \div f_{DR}$); (2) диапазон от 1 kHz до половината от горната гранична честота на преждеразгледания диапазон (1 kHz $\div f_{DR}/2$); и (3) диапазон, като този от точка (2), но с долна граница, равна на 30 kHz (30 kHz $\div f_{DR}/2$). На Фиг. IV-7 и Фиг. IV-8 са дадени сравнения на така моделираните с измерените електрически свойства, съответно за образец *plate N87* и образец *plate N97*.



Фиг. IV-7 Реална диелектрична проникваемост и специфична електропроводимост на Mn-Zn феритен материал N87, извлечени от измерванията на опитен образец *plate N87* и съответните свойства, моделирани чрез $R//Q + R//Q$ заместваща схема: *плътна линия* – резултати от измервания; *линии с маркери* – резултати, получени при използване на различни по ширина честотни диапазони като входни данни за моделирането. Съответните стойности на елементите на еквивалентната заместваща схема са дадени в Таблица IV-3.

Анализът на резултатите, дадени във Фиг. IV-7 и IV-8 сочи, че докато входен диапазон $f_{meas,min} \div f_{DR}$ води до най-добро моделиране, то диапазонът 1 kHz $\div f_{DR}/2$ също е подходящ честотен обхват за моделиране на електрическите свойства на тестваните материали. При реализацията на силови индуктори и трансформатори, Mn-Zn феритни материали се използват предимно при честоти над 20 kHz, така че точното моделиране под 1 kHz не е от особено значение. От друга страна, ако за горна граница на входния за моделирането честотен диапазон се приеме честота по-ниска от f_{DR} (честотата на локалния минимум в имагинерната част на комплексната относителна диелектрична проникваемост в $\log(0x)$ - $\log(0y)$ мащаб или алтернативно, локалния минимум във фазово-честотната характеристика в $\log(0x)$ -linear(0y)

машаб), това ще помогне да се избегне вероятността от моделиране на привидни вместо на присъщи свойства.



Фиг. IV-8 Реална диелектрична проникваемост и специфична електропроводимост на Mn-Zn феритен материал N97, извлечени от измерванията на опитен образец *plate N97* и съответните свойства, моделирани чрез $R//Q + R//Q$ заместваща схема: *плътна линия* – резултати от измервания; *линии с маркери* – резултати, получени при използване на различни по ширина честотни диапазони като входни данни за моделирането. Съответните стойности на елементите на еквивалентната заместваща схема са дадени в Таблица IV-3.

Също така, при моделирането с $R//Q+R//Q$ веригата, става ясно, че различна ширина на входния диапазон води до различни стойности на елементите на заместващата схема. Долната гранична честота на входния диапазон предопределя доброто моделиране на електрическите свойства под тази най-ниска честотна точка, но успешното моделиране при високите честоти не е така чувствително към ширините на разгледаните входни честотни диапазони. Въз основа на тези наблюдения може да се очаква, че известно екстраполиране на моделираните свойства над честотата на възникване на размерния резонанс все още може да отразява присъщите електрически свойства.

Основни изводи и предложения за практиката

Предложена е измервателна постановка за широкочестотно измерване на импедансните характеристикти на феритни образци при типични за силовата електроника температури. При измерване на импеданса на цилиндрични образци с относително голям диаметър е постигната възможност за наблюдение и анализ на феномена *размерен резонанс* и неговото влияние при импедансни измервания. При изследването на относително тесни образци, появата на размерния резонанс е придвижена към по-високи честоти.

На база резултатите от измерените импедансни характеристики са създадени електрически еквивалентни заместващи схеми за тяхното моделиране. Създадени са два вида модели – такива, които моделират само електрически свойства и такива, които съчетават както влиянието на електрическите, така и влиянието на магнитните свойства. Вторият модел е изграден чрез използването на първия модел. Резултира се в подход за разглеждане на размерния резонанс от перспективата на електрическите вериги. Чрез използване на създадените модели е установена закономерност, даваща връзка между най-малкия размер на контактната повърхност на образеца, дължината на вълната в материала и появата на размерния резонанс. По този начин са валидирани честотите, до които извлечените свойства са присъщи. Чрез използването на еквивалентни заместващи схеми, моделираните свойства са налични във форма, която е непрекъсната функция на честотата. Получените модели са подходящи за анализ в честотната област.

При извършване на нови измервания и позовавайки се на вече извършения анализ, са установени признаци в резултати от импедансни измервания, чрез които директно може да се идентифицира приблизителната честота на възникването на размерния резонанс, който се явява дори при използването на тънки образци. След това импедансните характеристики на тънките образци са моделирани чрез предложената еквивалентна заместваща схема за моделиране на присъщи свойства, при което тя е приложена успешно и за друга марка Mn-Zn ферит. За входни данни при моделирането са използвани различни ширини на честотни диапазони, „отрязани“ от данните от измерването. Така е показано, че за последна точка на входния диапазон може да се вземе честота по-ниска от тази на възникналия размерен резонанс, при което пак се моделират присъщи свойства и се избягва неволно подхождане към моделиране на привидни свойства.

Изследванията, описани в дисертационния труд, дават практически насоки за измерването и моделирането на присъщите електрически свойства на Mn-Zn феритни материали.

Приноси по дисертационния труд

1. Предложена е и детайлно е описана специализирана постановка, базирана на конвенционални лабораторни уреди, за широкочестотно измерване на импеданса на Mn-Zn феритни образци, при различни техни собствени температури.
2. В резултат на анализа е синтезирана универсална електрическа еквивалентна заместваща схема за моделиране на присъщите честотно зависими електрически свойства на Mn-Zn феритни материали.
3. Създадена е електрическа еквивалентна заместваща схема за моделиране на импедансна характеристика на Mn-Zn феритен образец, повлияна от размерния резонанс. Това е подход за разглеждане на размерния резонанс от гледната точка на електрическите вериги.
4. Получени са честотно зависимите присъщи електрически свойства на широко употребяван в практиката Mn-Zn феритен материал при типични за силовата електроника температурни режими. Получените зависимости са налични във форма, която е непрекъсната функция на честотата.
5. Установена е закономерност, отразяваща връзката между появата на размерния резонанс, най-малкият размер на контактната повърхност (напречната площ) на тествания Mn-Zn феритен образец и дължината на вълната в неговия обем.
6. Дефинирани и обосновани са признаци в резултатите от импедансни измервания на Mn-Zn феритни образци, за установяване на приблизителната честота на възникнал по време на измерването размерен резонанс.
7. Определен е необходим, входен към процеса на моделиране честотен диапазон, за моделиране на присъщите електрически свойства на Mn-Zn феритни образци. Диапазонът позволява изолиране влиянието на размерния резонанс при подхождане към моделирането на присъщи електрически свойства.

Приноси 2, 3 и 5 могат да се определят като научно-приложни. Останалите приноси се определят като приложни.

Публикации по дисертационния труд

1. T. P. Todorova, A. Van den Bossche and V. Valchev, "A procedure for the extraction of intrinsic ac conductivity and dielectric constant of N87 Mn-Zn ferrite samples based on impedance measurements and equivalent electrical circuit modeling," *IEEE Trans. Power Electron.*, Feb. 2018. [Online]. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/document/8281626/>.
2. T. P. Todorova, V. Valchev and A. Van den Bossche, "Modeling of electrical properties of Mn-Zn ferrites taking into account the frequency of the occurrence of the dimensional resonance", (*submitted to the Journal of Electrical Engineering*), Feb. 2018.
3. T. Todorova, "An approach for measurements of wideband impedance of ferrite samples by means of conventional laboratory instruments," presented at the National Forum Electronics 2017 Meeting, Sofia, Bulgaria, May 2017.
4. V. C. Valchev, A. Van den Bossche and T. P. Todorova, "Influence of operating frequency on design of power electronic transformers", *J. Phys.: Conf. Ser.*, vol. 903, 2017.
5. V. C. Valchev, T. P. Todorova and A. Van den Bossche, "Comparison and design of DC chokes based on different magnetic materials," in *Proc. 26th ET Conf.*, Sozopol, 2017, pp. 1-4.
6. V. C. Valchev, T. P. Todorova and A. Van den Bossche, "Comparison and design of power electronics transformers in 25 kHz–400 kHz range," in *Proc. 19th SIELA Conf.*, Bourgas, 2016, pp. 1-4.
7. V. C. Valchev, T. P. Todorova, P. V. Yankov and A. Van den Bossche, "Design considerations and loss analysis of DC chokes," in *Proc. 19th SIELA Conf.*, Bourgas, 2016, pp. 1-3.
8. V. C. Valchev, T. P. Todorova and A. V. den Bossche, "Comparative study of winding arrangements for power electronic transformers," in *Proc. 25th ET Conf.*, Sozopol, 2016, pp. 1-4.

Abstract

The dissertation addresses problems related to the measurement and modeling of the intrinsic electrical properties of Mn-Zn ferrite materials. Chapter I focuses on key aspects of these materials in the context of power electronics. Chapter II proposes a setup for wideband impedance measurements of Mn-Zn ferrite samples at typical power electronics temperatures. Results of measurements of specific samples are given. With the testing of cylindrical samples of relatively large diameter, it was possible to observe and analyze the *dimensional resonance* phenomenon. With the use of relatively narrow samples, the appearance of dimensional resonance is shifted to higher frequencies. Based on the results of the measured impedances in Chapter II, in Chapter III, equivalent electrical circuits for their modeling are synthesized. Circuits have been created that only model electrical properties and those that combine both the influence of electrical and the influence of magnetic properties. Based on the synthesized circuits, a regularity was established, giving a connection between the size of the contact surface of the sample, the wavelength in the material, and the appearance of the dimensional resonance. In Chapter IV, signs in impedance measurement results are defined by which it can directly be identified the approximate frequency of the dimensional resonance occurrence. Using these signs, various cases of modeling the properties of tested Mn-Zn ferrite samples are regarded. In addition, the synthesized equivalent circuit modeling intrinsic electrical properties has been successfully applied to another grade of Mn-Zn ferrite.

Резюме

В диссертации рассматриваются проблемы, связанные с измерением и моделированием собственных электрических свойств ферритных материалов Mn-Zn. В главе I основное внимание уделяется ключевым аспектам этих материалов в контексте силовой электроники. В главе II предлагается настройка широкополосных измерений импеданса образцов феррита Mn-Zn при типичных температурах силовой электроники. Приведены результаты измерений конкретных образцов. Тестирование цилиндрических образцов с относительно большим диаметром достигло способности контролировать и анализировать явление *размерного резонанса*. При использовании относительно узких моделей появление размерного резонанса смещается на более высокие частоты. На основе результатов измеренных импедансов в главе II в главе III были синтезированы эквивалентные схемы замещения для их моделирования. Созданы схемы, которые только моделируют электрические свойства и те, которые сочетают в себе как влияние электричества, так и влияние магнитных свойств. На основе синтезированных моделей устанавливается закономерность, дающая связь между размером контактной поверхности образца, длиной волны материала и появлением размерного резонанса. Глава IV определяет признаки результатов измерения импеданса, чтобы непосредственно идентифицировать приблизительную частоту размерного резонанса. Используя эти признаки, были проанализированы различные случаи моделирования свойств образцов феррита Mn-Zn. Кроме того, синтезированная эквивалентная схема, моделирующая собственные электрические свойства, успешно применяется к другому классу феррита Mn-Zn.

Благодарности

Издавам своите сърдечни благодарности на моя научен ръководител, проф. д-р инж. Венцислав Вълчев от катедра ЕТМ, ТУ-Варна, за гласуваното доверие и предоставените възможности, за помощта, съветите и подкрепата, както и за проявеното търпение при разработването на дисертацията. За мен беше привилегия да работя под нещото му ръководство, което допринесе много за професионалното ми развитие.

Също така бих искала да изкажа своите благодарности на prof. dr. ir. Alex Van den Bossche от EELab, Ghent University, за предоставената възможност и оказаната подкрепа, за ценните идеи и градивната критика, които спомогнаха много за разработването на дисертационния труд.

Специални благодарности дължа на доц. д-р инж. Валентин Матеев и проф. д-р инж. Илиана Маринова от катедра ЕА, ТУ-София за съдействието им за измерванията на образците, докладвани в Глава IV от дисертацията. В допълнение, благодаря на доц. д-р инж. Валентин Матеев за отделеното време, полезните дискусии и съветите.

Благодаря на всички незнани рецензенти на публикациите по дисертационния труд, чиято критика беше предизвикателство и която значително ми помогна в разработването на дисертацията.

На края искам да изкажа своята дълбока благодарност на родителите ми, Соня Тодорова и Пламен Тодоров, и на приятеля ми, Янко Демирев, за любовта, разбирането и подкрепата, с които ми даваха сили през цялото време.