



ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ СОФИЯ
ЕЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИ ФАКУЛТЕТ

КАТЕДРА ЕЛЕКТРИЧЕСКИ АПАРАТИ

инж. Михаела Димитрова Славкова

**ПРИЛОЖЕНИЕ НА АМОРФНИ МАГНИТНО МЕКИ СПЛАВИ В
ЕЛЕКТРИЧЕСКИТЕ АПАРАТИ И ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ**

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

на дисертация за присъждане на образователна и научната степен
„ДОКТОР”

Направление 5.2 ”Електротехника, електроника и автоматика”

Научна специалност: „Електрически апарати”

Научен ръководител:

проф. д-н. Минчо Минчев

Рецензенти:

проф. д-р Иван Ангелов Масларов

проф. д-р Иван Костадинов Миленов

Научно жури:

проф. д-н Иван Стоянов Ячев

проф. д-н Минчо Савов Минчев

проф. д-р Иван Ангелов Масларов

проф. д-р Иван Костадинов Миленов

доц. д-р Антон Георгиев Андонов

София, 2015 г.

Дисертационният труд съдържа 6 глави, изложени на 158 страници, в които са включени 57 фигури, 12 таблици и уравнения. Списъкът на литературните източници е 340.

Означенията на главите, формулите, фигурите и таблиците в автореферата съответстват на тези от дисертационния труд.

Дисертационният труд е обсъден и насочен за защита на заседание на разширен катедрен съвет на катедра „Електрически апарати” при Технически университет –София, състояло се на 27.04.2015 г.

Защитата на дисертационния труд ще се състои на 16.09.2015 г. от 17:30 часа в зала 2140 на Технически Университет – София.

Материалите по защитата са на разположение на интересующите се в канцеларията на Електротехнически факултет при Технически Университет – София.

Автор: инж. Михаела Димитрова Славкова

Заглавие: ПРИЛОЖЕНИЕ НА АМОΡФНИ МАГНИТНО МЕКИ СПЛАВИ В
ЕЛЕКТРИЧЕСКИТЕ АПАРАТИ И ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

Тираж: 50 бр.

Издателство на Технически Университет - София

Увод

Аморфните метални сплави са нови материали в сравнение с класическите кристални магнитно меки сплави. Метални сплави с аморфен, а не кристален строеж са известни още от далечната 1934 г, като аморфните сплави с феромагнитни свойства са добити за първи път в края на шестдесетте години на миналия век. Техният уникален комплекс от характеристики и свойства е оценен веднага. Интересът към приложенията им е предизвикал интензивни изследвания, които, за съжаление, за определен период не са били публично достатъчно достъпни.

Всеобщо е убеждението, че аморфните магнитно меки сплави и модифицирането им в нанокристални магнитно меки материали, предлагат широки възможности за нови практически приложения. Изследванията за търсене и доказване на ефективни приложения следват получаването на материалите и развитието на конструктивните и технологични възможности за производство. Днес редица устройства за импулсно възбуждане на квантови генератори, ускоряване на елементарни частици, радиолокационни системи, източници на ултравиолетова светлина за биохимично обеззаразяване, системи за магнитно компресиране на импулси с голяма мощност и други перспективни приложения се изпълняват с аморфни магнитни сплави. Широко приложение тези материали имат и при индивидуални разпределителни трансформатори за промишлена честота, в специални измервателни трансформатори, в защитни прекъсвачи за остатъчен ток и в редица специални електронни преобразуватели. И все пак, въпреки почти половинвековното им съществуване, тяхната популярност и приложение не съответстват достатъчно на отличните им характеристики.

Настоящият дисертационен труд изследва проблеми на приложение на магнитни сплави с аморфен строеж в електрическите апарати и преобразуватели. Представените изследвания са провеждани в относително дълъг период и отразяват не само проблемите на приложенията, но и характерни за началния период изследвания върху конструктивно- технологични проблеми за създаване на магнитопроводи от аморфни магнитни сплави. Основната цел на дисертационния труд е да се създадат условия и да се проведат изследвания, които да задълбочат познанията за приложение на аморфни магнитно меки сплави в електрическите апарати и преобразуватели, като се потърсят подходящи критерии за насочване на изследванията за приложения и нови насоки за развитието им.

Глава 1 Анализ на проблема

1.1. Кратка историческа справка

Аморфните метални сплави добиват популярност в началото на седемдесетте години на XX век, когато са разработени високоефективни технологии за получаването им във вид на тънка лента или нишка [5, 20, 54, 57, 62, 69, 100, 137, 276]. С получаването на метал в аморфно състояние, се разглеждат вече два класа метали и сплави, отличаващи се по своята структура и свойства – кристални и аморфни [322]. В процеса на изследователската работа върху технологията за бързо втвърдяване са открити и изследвани различни структури. Така са получени и нанокристалните сплави, които запълват междината между аморфните и кристалните метали [20, 276].

Аморфните метални сплави притежават уникални характеристики, а съизмеримата им вече цена с тази на познатите досега магнитно меки кристални материали ги прави конкурентноспособен материал в редица устройства. В някои от тях те се явяват единствен възможен материал за изпълнението им. [11, 17, 20, 21, 23, 26, 27, 32, 36, 38, 39, 46, 48, 51, 55, 56, 58, 61, 62, 137, 276, 317, 322]. Това налага да се насочат изследвания за определяне на границите им на приложение в електрическите апарати и преобразуватели.

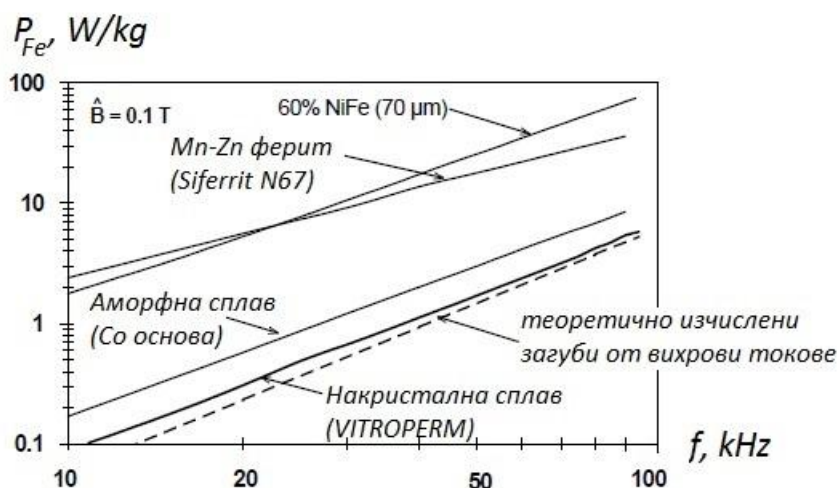
Могат да се отличат следните причини, които определят целесъобразността от широкото приложение на аморфните сплави в съвременната промишленост:

- *повишение на качеството на традиционната продукция в следствие на използването на материали с по-добри работни характеристики;*
- *възможност за създаване на устройства от ново поколение, базирани на уникалния комплекс от свойства, характерен за аморфните метални сплави (АМС);*

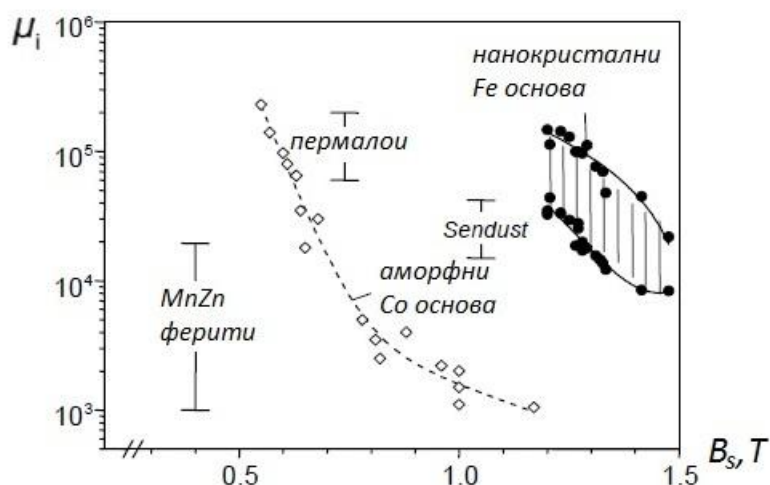
1.2. Основни характеристики на аморфните магнитно меки материали

Сферата на приложение на аморфните и нанокристални магнитно меки сплави непрекъснато се разширява като особенният интерес към тях е обусловен поради следните им специфични качества:

- ниски загуби от хистерезис и вихрови токове, в широк честотен диапазон¹;
- висока магнитна проникваемост²;
- възможност за промяна на типа на хистерезисния им цикъл чрез допълнителна термообработка или термомагнитна обработка;
- ясно изразен тип на хистерезисния цикъл - правоъгълен или линеен за аморфни магнитно меки сплави и линеен за нанокристални магнитно меки сплави;



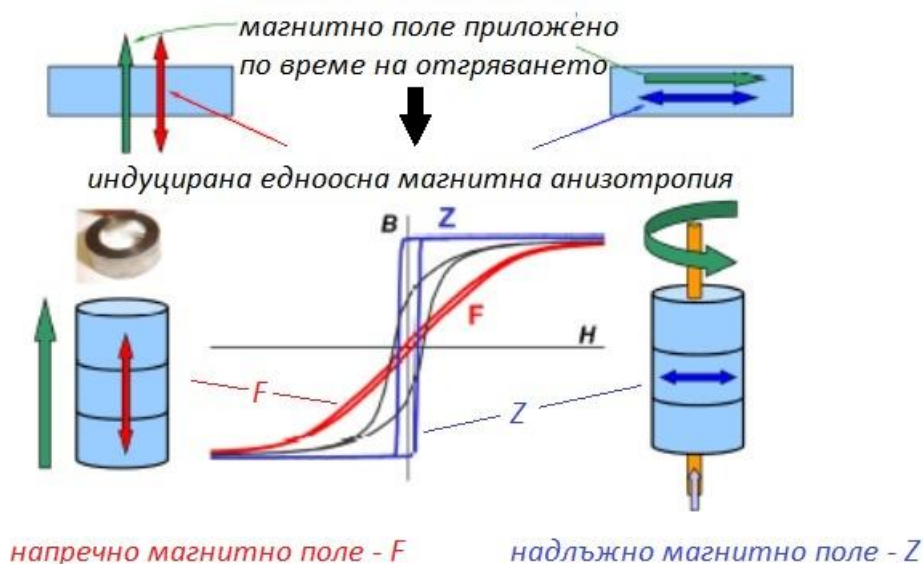
Фигура 1.1 Сравнение на загубите на различни материали



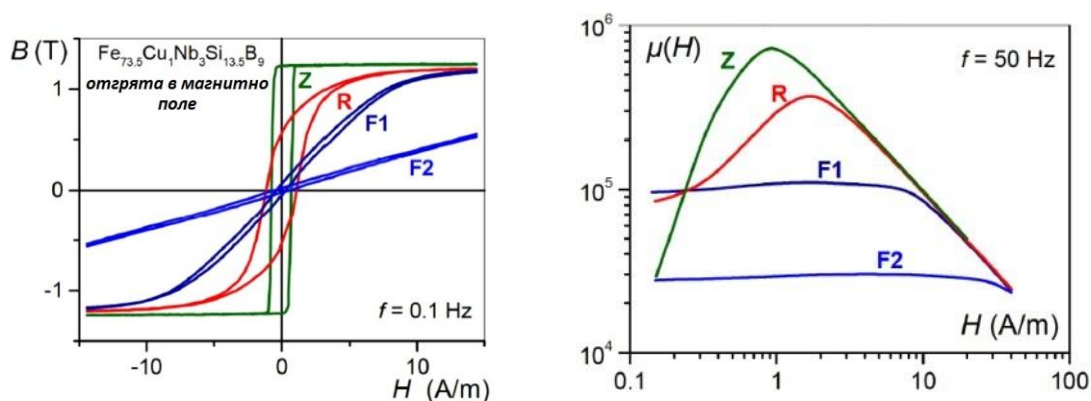
Фигура 1.2 Начална магнитна проникваемост в зависимост от магнитната индукция

¹ Например при промишлени честоти, загубите са 4÷5 пъти по-ниски от загубите в силициевите електротехнически стомани.

² Достигнати са стойности за максималната стойност на относителната магнитна проникваемост до 1 500 000 ($1,5 \cdot 10^6$).



Фигура 0.1 Термообработка и термоманитна обработка



Фигура 0.2 Типове хистерезисни цикли (правоъгълен тип Z, линеен тип F и раунд тип R): $B(H)$ и $\mu(H)$

1.3. Структурни особености на аморфните метални сплави

Аморфните метални сплави са с атомна структура, при която е запазен характерния за течния метал и аморфното състояние близък порядък в разположението на атомите. Структурата наподобява на замръзнала течност и стъкло, откъдето идва и наименованието "метални стъкла". При тях отсъстват кристалните зърна и граници, което обуславя уникалния им комплекс от свойства – магнитни, електрически, механични, като те са с висока степен на изотропност.

1.4. Методи за получаване на аморфни метални сплави.

Аморфното състояние е възможно да бъде получено при преход от трите изходни състояния: газообразно, течно и твърдо (кристално). Методите на получаване на аморфната метална структура могат да бъдат отнесени към една от следните групи методи на получаване : [20, 137, 276, 317, 322]

- ❖ *отлагане на метал от газова фаза;*
- ❖ *втвърдяване на течен метал;*
- ❖ *въвеждане на дефекти в кристалната решетка.*

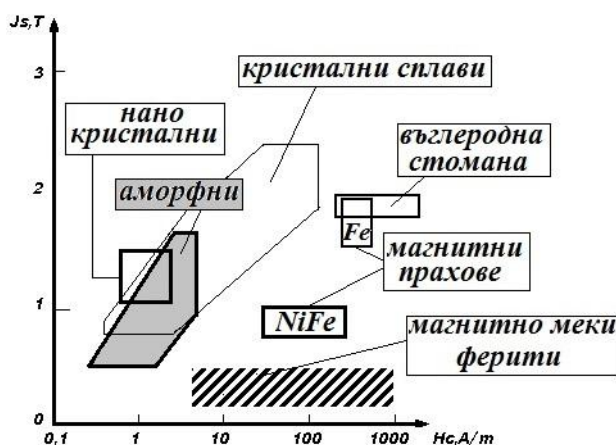
Най-разпространеният начин за получаване на аморфни сплави е по методите на бързо закаляване от стопилка. При тези методи се достигнат високи скорости на охлаждане на разтопената сплав, от порядъка на 10^5 - 10^7 K/s, водещи до "замръзване" на течното състояние. Те

са от значение за промишленото получаване на аморфни метални сплави за лентови навити тороидални магнитопроводи и са познати под общото название - методи на закаляване от течно състояние или методи на закаляване от стопилка (melt quenching).

1.5. Състав, класификация и свойства на аморфните метални сплави според съдържанието на носителите на феромагнетизма – желязо, кобалт и никел

Аморфните метални сплави по отношение на състава си се разделят на две основни групи: метал - метал и метал - металоид. При тях носители на магнитните свойства са атомите на метали като **Fe** желязо, **Co** кобалт и **Ni** никел, а атомите, които стабилизират аморфното състояние са добавки от типа бор, фосфор, въглерод, силиций и др. Водеща за състава на аморфните метални сплави е формулата T_xM_{100-x} като $70 \leq x \leq 80$. Аморфни метални сплави могат да се получат и при участие на елементи от преходните групи като *V, Nb, Ta, Cr, Mo и Mn*.

В зависимост от това кой е преобладаващият елемент - носител на феромагнетизма, аморфните метални сплави се делят на сплави на желязна, на кобалтова или на никелова основа (*Fe, Co* или *Ni*) и съответно притежават специфични магнитни характеристики. Сплавите на желязна **Fe** основа са разработени за приложения търсещи най-високите нива на магнитната индукция на насищане и възможно най-малко скъпоструващи сурови материали. Сплавите на кобалтова **Co** основа имат най-висока магнитна проникваемост в сравнение с всички останали аморфни метални сплави. Сплавите на основа никел-желязо **Ni-Fe** са с много добри магнитоеластични характеристики и те могат да бъдат използвани като сензори на магнитоеластични деформации.



Фигура 1.7 Преглед на характеристиките на магнитно меките материали.

1.6. Други свойства на аморфните метални сплави.

Важни свойства за аморфните метални сплави са тяхната твърдост и якост. Аморфните метални сплави са магнитно меки като същевременно са механично твърди. От химична гледна точка аморфните магнитно меки метални сплави са съвършено нови материали. Структурата на аморфните метали, макар и да е най-неподредена от всички известни досега твърди структури, от химична гледна точка е идеално еднородна. Тя е най-еднородната твърда структура, позната досега. Специфичното електрическо съпротивление на аморфните метални сплави е доста по-високо от това на кристалните метали и е от порядъка на $100 \div 300 \cdot 10^{-8} \Omega.m$. В аморфните сплави магнитоотрицателността е изотропна. Установено е, че магнитоотрицателността на аморфните магнитно меки сплави, зависи от химическия състав на сплавта. Възможно е създаването на композиции с нулева магнитоотрицателност, каквито вече има.

1.7. Класификация на приложенията на аморфните метални сплави в зависимост от типа на хистерезисния им цикъл

Аморфните магнитно меки сплави се характеризират с три типа хистерезисни цикли като последните два са почти "идеални"

R: "ROUND" хистерезисният цикъл е със стойност на остатъчната магнитна индукция B_r приблизително 50% от стойността на магнитната индукция на насищане B_s ; $B_r/B_s \approx 0,50$

Z: Правоъгълен хистерезисен цикъл, при който остатъчната магнитна индукция е много висока - B_r превишава 95% от стойността на магнитната индукция на насищане B_s ; $B_r/B_s \leq 0,95 - 0,98$

F: Полегат или линеен хистерезисен цикъл е с много ниска стойност на остатъчната магнитна индукция - под 10 % от магнитната индукция на насищане B_s ; $B_r/B_s \leq 0,1 - 0,05$

1.8. Термообработка на аморфни метални сплави.

Последващата термообработка на аморфните магнитно меки сплави води до структурна релаксация, която е ефективно средство за подобрене на магнитните им свойства. Намалението на вътрешните напрежения води до намаление на коерцитивния интензитет. В зависимост от приложеното магнитно поле при термообработка - напречно или надлъжно, могат да бъдат получени материали съответно с линеен (F) или правоъгълен (Z) хистерезисен цикъл. Хистерезисен цикъл от типа раунд (R) се получава при термична обработка без магнитно поле.

1.9. Приложения на аморфни и нанокристални сплави в електрически апарати и преобразуватели

Аморфните метални сплави имат разнообразни приложения. В практиката са се установили две основни насоки при използването им:

- като немагнитни сплави - с висока пластичност, корозионна устойчивост и други специфични характеристики;
- като магнитно меки материали в електромагнитни устройства;

1.10. Изводи, цел и задачи на дисертационния труд

След направения преглед на литературните източници за структурата, свойствата и характеристиките на аморфните и нанокристалните магнитно меки сплави, начините им на получаване и на последваща термообработка, както и очертаните им приложения може да се направят следните изводи:

1.10.1. Структурата на аморфните метални сплави обуславя специфичните им свойства, които ги отличават от останалите магнитно меки материали. Това от своя страна предопределя възможността за широк диапазон от приложения като магнитно мек материал за магнитопроводи.

1.10.2. Промишлено произвежданите аморфни магнитно меки сплави се получават под формата на тънка лента с дебелина до 30 μm и ширина до 120 cm. Размерите се определят от технологията им на получаване, което налага като най-подходящо приложението им като материал за лентови магнитопроводи.

1.10.3. Магнитопроводите от аморфни магнитно меки сплави се подлагат на допълнителна термо или термомагнитна обработка с цел подобряване или получаване на желани характеристики т.е. те могат да бъдат с моделиран хистерезисен цикъл.

1.10.4. Приложенията им могат да бъдат диференцирани в различни направления и разгледани в зависимост от типа на хистерезисния им цикъл – правоъгълен, линеен или раунд.

1.10.5. Относно приложението им:

- От една страна трябва да се търсят нови приложения на аморфните магнитно меки сплави в съществуващи вече устройства поради по-добрите им характеристики ;
- От друга страна трябва да се разглеждат не толкова като заместители на съществуващите материали, колкото и като материали за ново поколение

различни устройства, уреди и системи, създаването на които е невъзможно без наличието комплексните им характеристики

Целта на дисертационния труд е да се създадат условия за експериментално получаване на магнитопроводи от аморфни метални сплави и да се проведат изследвания за приложения в електрическите апарати и преобразуватели, като се потърсят критерии за насочване на изследванията и се проверят нови насоки за развитието им.

Изпълнението на така поставената цел изисква решаването на следните задачи:

1. Да се проучат и обобщят изискванията към конструкцията и технологията за изработване на магнитопроводи с тороидална форма от аморфна метална лента и на тази основа да се осъществи експериментално производство и изпитване;
2. Да се изследват експериментално възможности за получаване на желани характеристики на аморфни магнитно меки сплави посредством термо или термоманитна обработка;
3. Да се потърсят приложения на аморфните магнитно меки сплави на база на класификация на техните магнитни характеристики – тип R, Z и F ;
4. Да се изследват приложения с магнитопроводи с граничните характеристики – правоъгълен (Z) и линеен (F) и да се очертаят целесъобразните граници на приложението им, като се прецизират насоките при избор на подходящ магнитно мек материал за лентови тороидални магнитопроводи, използвани в електрическите апарати и преобразуватели;
5. Да се предложат характерни елементи от методики за проектиране на електромагнитни елементи с гранични Z и F характеристики;
6. Да се изследва поведението на електромагнитни елементи с аморфни магнитно меки сплави при несиметрични режими на работа, породени от различни причини;
7. Да се изследват възможности за разширяване на приложенията чрез използване на съставни магнитопроводи както от аморфни сплави, така и от аморфни и кристални сплави.

Глава 2 Конструкция и технология на изработка на тороидални лентови магнитопроводи от аморфни метална сплави

2.3.4.1. Модул "Измерване"

В този модул са включени всички операции, свързани с входящия и крайния контрол на механични параметри и измерване на магнитни характеристики, за сортиране, маркировка и опаковка на готовата продукция.

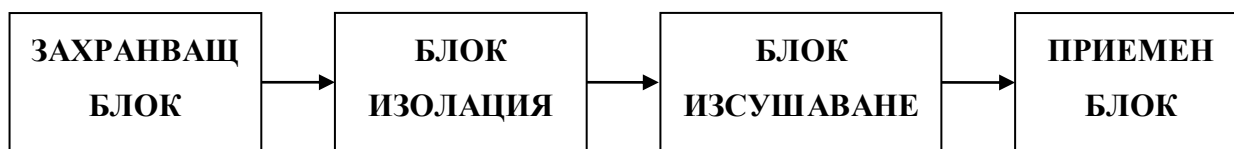
А. Входящ контрол - целта е да се измерят геометричните размери на аморфната лента. Проверката им е необходима, тъй като те съществено влияят на коефициента на запълване на лентовия тороидален магнитопровод. Този коефициент определя не само габаритите на магнитопроводите, но и важни параметри на устройствата, произведени с тях. Целесъобразно е коефициентът на запълване на магнитопровода да е по-голям от 0,8.

В. Магнитни характеристики - контролът на магнитните характеристики се извършва преди и след термо или термоманитна обработка на магнитопровода. Целта е да се установи ефектът от допълнителната обработка на магнитопровода, както и да се измерят получените характеристики на готовия магнитопровод. Измерването може да се осъществи при ниски и високи честоти.

С. Краен контрол, сортиране, маркиране, опаковка - включва проверка на характеристиките на магнитопровода, издаване на сертификат на изделието.

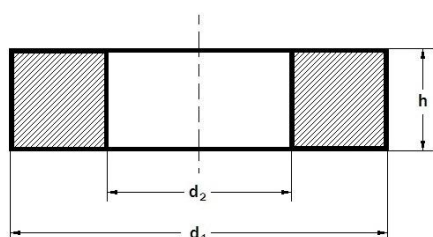
2.3.4.2. Модул "Изоляционно покритие и навиване на тороидални магнитопроводи".

Производителите на аморфни феромагнитни сплави предлагат аморфната метална лента в неизолиран вид. За целта е разработена технологична линия за нанасяне на междуслойното изоляционно покритие при навиване на тороидални магнитопроводи. Блоквата схема на разработената технологична линия за нанасяне на изоляционното покритие е дадена на Фигура 2.1.



Фигура 2.1 Блок-схема на технологична линия за нанасяне на изолационно покритие

Усвоените типоразмери на тороидални магнитопроводи са дадени в Таблица 2.1. с наклонен шрифт. Тя е разработена на основание на DIN 42311. [104] Някои от типоразмерите са постигнати с набор от различни широчини аморфна лента. Размерите, дадени в таблицата, са за магнитопроводи без защитен елемент – тип „А” от стандарт DIN 42311. [104] На Фигура 2.2. са дадени означенията на магнитопровода. Нестандартните изпълнения са дадени в Таблица 2.2, която е създадена на база на досега съществуващите потребности.



, където:

d_1 – външен диаметър на магнитопровода;

d_2 – вътрешен диаметър на магнитопровода;

h – височина на магнитопровода;

Фигура 2.2. Размери на магнитопровода

Таблица 2.1 Усвоени типоразмери на тороидални магнитопроводи.

$d_1/d_2=1.25$				$d_1/d_2=1.6$				$d_1/d_2=2.0$			
Означ.	d_1	d_2	h	Означ.	d_1	d_2	h	Означ.	d_1	d_2	h
-	mm	mm	mm	-	mm	mm	mm	-	mm	mm	mm
-	-	-	-	-	-	-	-	8x4	8	4	4
10x8	10	8	4	10x6.3	10	6.3	4	10x5	10	5	5
12.5x10	12.5	10	5	12.5x8	12.5	8	5	12.5x6.3	12.5	6.3	6
16x12.5	16	12.5	6	16x10	16	10	6	16x8	16	8	8
20x16	20	16	8	20x12.5	20	12.5	8	20x10	20	10	10
25x20	25	20	10	25x16	25	16	10	25x12.5	25	12.5	12.5
32x25	32	25	12.5	32x20	32	20	12.5	32x16	32	16	15
40x32	40	32	15	40x25	40	25	15	40x20	40	20	20
50x40	50	40	20	50x32	50	32	20	50x25	50	25	25
63x50	63	50	25	63x40	63	40	25	63x32	63	32	30
80x63	80	63	30	80x50	80	50	30	80x40	80	40	40
100x80	100	80	40	100x63	100	63	40	100x50	100	50	50

Таблица 2.2 Нестандартни изпълнения на магнитопроводи.

Означение	d_1	d_2	h
-	mm	mm	mm
25x20	25	20	5
32x20	32	20	5
32x20	32	20	8
60x40	60	40	8
32x20	32	20	10
140x100	140	100	10
140x100	140	100	15
125x80	125	80	20
140x100	140	100	20
100x63	100	63	50

2.3.4.3. Модул "Термомагнитна обработка"

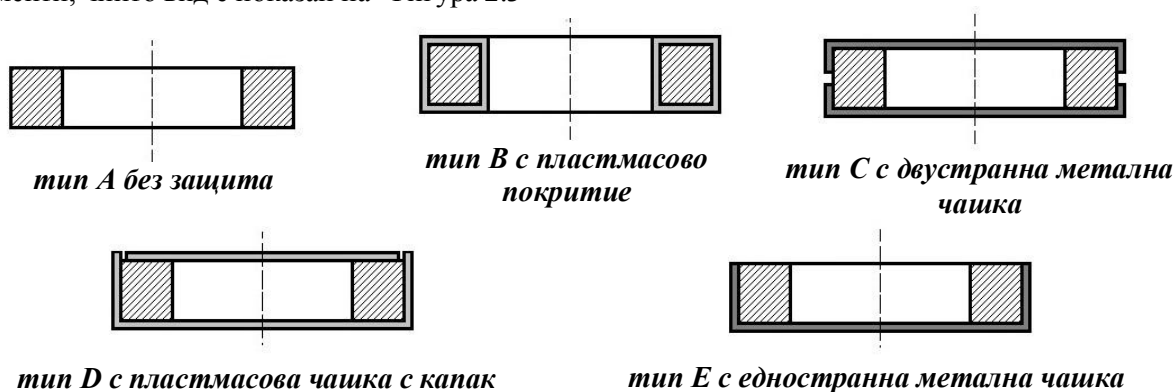
Осигурена е температура на нагряване от 0 до 600°C с точност $\pm 3^\circ\text{C}$. Магнитното поле е с интензитет от 300 до 600 A/m. В зависимост от желаните характеристики може да се прилага надлъжно или напречно магнитно поле.

2.3.4.4. Модул "Механична защита"

Има три възможности за осъществяване на защитата на магнитопроводите:

- чрез нанасяне на пластмасово покритие по метода на вихрово напластяване върху тороида;
- чрез поставяне на магнитопровода в пластмасов защитен елемент - пластмасова чашка;
- чрез поставяне на магнитопровода в метална защитна кутия – метална чашка;

За целите на технологичната линия е изработена екипировка за производство на защитни елементи, чийто вид е показан на Фигура 2.3



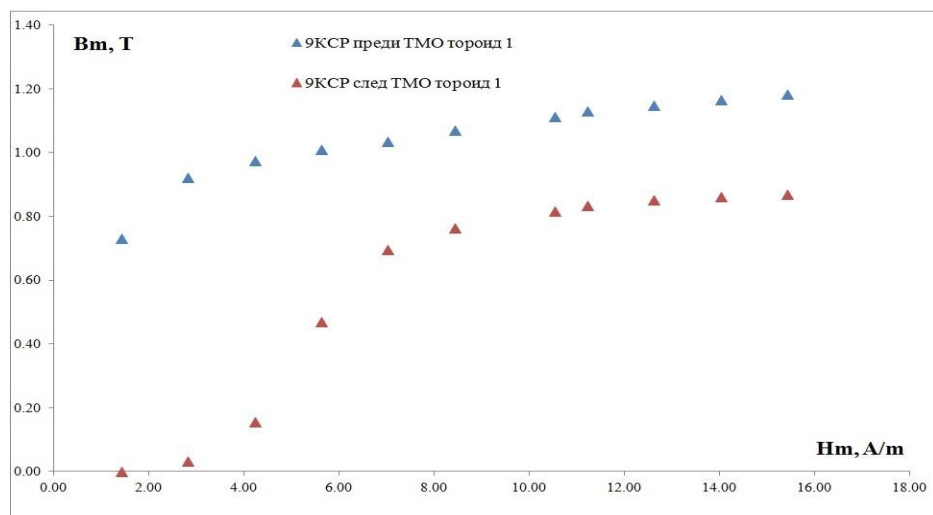
Фигура 2.3 Вид и означения на защитните елементи на магнитопроводи



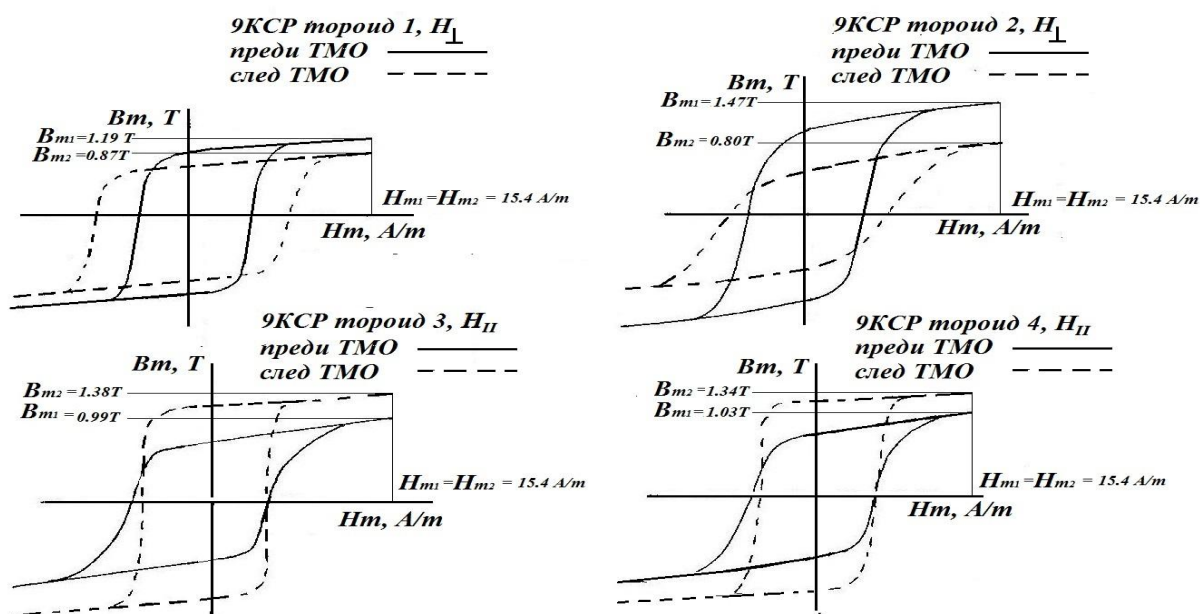
Фигура 2.4 Пластмасови защитни елементи за лентови магнитопроводи



Фигура 2.5 Тороидален магнитопровод с едностранна метална чашка



Фигура 2.8 $B_m(H_m)$ характеристики на 9KCP преди и след ТМО



Фигура 2.9 Динамични хистерезисни цикли на термомагнитно обработена и сурова сплав 9KCP

2.7. Изводи

2.7.1. Въз основа на обстоятелни проучвания и изследвания са дефинирани изисквания към конструкцията и технологията за изработване на магнитопроводи с тороидална форма от аморфна феромагнитна лента и на тази основа е осъществена експериментална линия за производство и изпитване на гама магнитопроводи;

2.7.2. Изследвани и експериментално са проверени и внедрени термомагнитни обработки за получаване на желани характеристики от типовете Z, R, както и F при различни стойности на магнитната проникваемост;

2.7.3. В съответствие с проведените изследвания и анализи са разработени и се експлоатират над 1000 магнитопровода. Те работят успешно повече от 10 години и са с устойчиви във времето характеристики.

Глава 3 Приложения на аморфни метални сплави с правоъгълен хистерезисен цикъл – тип Z

3.1. Области на приложение

Магнитопроводите с правоъгълен хистерезисен цикъл, или както още е известен като хистерезисен цикъл тип Z, имат специфични приложения. Те са в основата на т.н. „насищащи се дросели“ или наричани още „магнитни ключове“, както и на някои магнитни усилватели, по-специално на бързодействащите магнитни усилватели без управляваща намотка (т.е. с една намотка, която изпълнява функции и на работна, и на управляваща намотка).

3.1. Приложение в импулсен DC/DC преобразувател

Преимствата при използване на магнитни усилватели в захранващите източници в ключов режим, довеждат до бързо увеличение на приложението им в световен мащаб. Конструкцията им е проста (магнитопровод с една намотка за товар и управление), схемата също и е изключително надеждна [22, 98,154, 277, 279,320, 322] Основен елемент в управлението на бързодействащи магнитни усилватели без управляваща намотка (с една намотка), използвани в импулсни DC/DC преобразуватели е дроселът с насищане с правоъгълен хистерезисен цикъл (магнитен ключ).[154, 274, 277, 279]

Използването на дросел с насищане като силов комутационен елемент има следните предимства:

- с увеличаване на честотата магнитните усилватели намаляват габаритите си докато транзисторните комутатори ги увеличават;
- имат по - дълъг експлоатационен срок, по - висока надеждност, шумозащитеност, по - устойчиви са на облъчване, вибрации и висока температура;
- те са едновременно и силов комутационен елемент и защита на нерегулация преобразувател от късо съединение и претоварване;

Висококачествените импулсни DC/DC преобразуватели имат предимства при голям брой изходи, както и при тежки условия на експлоатация, които се дължат на предимствата на „магнитните ключове“, които заместват силови транзисторни ключове [154, 274, 277, 279] Тук е изследвано приложение, което е внедрено в БТК при автоматизиране на телексите съобщения през 1999 г., във всички окръжни станции. Изследвани са особеностите при проектирането на дроселите с насищане като са дадени и съображенията за избор на материал за магнитопровода [20, 274, 276, 278, 326]. Проведена е експериментална проверка на предложените съотношения за оразмеряване върху DC/DC преобразувател с четири изходящи напрежения при обща мощност 800 W.

3.3 Основни съотношения за оразмеряване

Насищащите се дросели от посочената схема са оразмерени в съответствие със следните съображения и съотношения. Предлага се оразмеряването на магнитния ключ да стане спрямо напрежението на вторичната страна на трансформатора U_2 , V, след което да се направи проверка за допустимата му температура на загряване. Предварително са зададени изходящото напрежение и токът на преобразувателя, в който участва магнитният усилвател – U_a , V и I, A. Основните съотношения на тороидалния магнитопровод са базирани на стандарт DIN 42311 (IEC 60635:1978), отнасящ се до лентови тороидални магнитопроводи от магнитно меки материали. Достига се до израза:

$$/3.15/ \quad d_2^4 \cdot (1 - k_0^2) \cdot (k_1 - 1) \cdot k_2 = \frac{U_2 \cdot I}{\pi \cdot \sqrt{2} \cdot B_m \cdot f \cdot \Delta \eta_{Cu} \cdot \eta_{Fe}}$$

След като се избере материал за магнитопровода на дросела с насищане, дясната страна на равенството е напълно определена. Коефициентите k_0 , k_1 и k_2 са стандартизирани, следователно е необходимо да се избере подходящия размер за вътрешния диаметър на магнитопровода с цел да се удовлетвори равенството. Подбор на размера на вътрешния диаметър на магнитопровода се прави като се има предвид стандарт DIN 42 311 (IEC 635 - 1978) [104]. След което се прави проверка за допустимата температура на загряване.

/3.20/

Таблица 3.1 Данни за мощността на отделните канали и КПД

канал	U, V	I, A	P, W	η , %
- 24 V	24.03	2.10	50.47	
+24 V	24.24	2.65	64.24	
- 48 V	47.80	2.84	135.75	
+ 60 V	60.00	2.32	139.20	
			$P_{\Sigma} \cong 400$	84,7 %

3. 5. Изводи

3.5.1. Предложена е методика за проектиране на насищащи се дросели в DC/DC преобразуватели;

3.5.2. На база на предложената методика и създадената гама от магнитопроводи, описана в Глава 2, е разработен четири изходен DC/DC преобразувател с насищащи се дросели, с обща изходяща мощност 800 W;

3.5.3. Разработеният преобразувател е внедрен в захранващите блокове на телексен мултиплексор MUX 238 за нуждите на БТК;

3.5.4. Добрата работа по време на експлоатацията на разработените преобразователи доказва както методиката за проектиране, така и добрите характеристики на разработената гама магнитопроводи от аморфни сплави.

Добрите експерименталните данни доказват приложимостта на този начин на оразмеряване на магнитни ключове. Методът е използван при оразмеряването на магнитни ключове за регулиране на изходящите напрежения в захранващия блок за телексен мултиплексор MUX 238, от който са произведени 64 броя за нуждите на БТК.

Глава 4 Приложения на аморфни метални сплави с линеен хистерезисен цикъл – тип F (FLAT)

4.1. Области на приложение

Магнитните материали с линеен хистерезисен цикъл имат подчертани предимства при измервателни трансформатори, при редица приложения на дросели, при сензори и други, които изискват добри характеристики при нисък интензитет на магнитното поле в порядъка на 0.5A/m, а също така при несиметрични режими на работа, продиктувани от различни причини, както от захранващите системи, така и от нелинейни товари. Познати са редица кристални сплави от групата на желязо-никеловите пермалои, които имат отношение B_r/B_s от 0,12 до 0,15. Аморфните сплави с линеен хистерезисен цикъл се отличават с по-висока степен на линейност и отношението B_r/B_s при тях е от порядъка на 0,05 [20, 86, 137, 276, 317, 322].

4.2. Приложение в линейни дросели

Особен интерес представляват линейните дросели с тороидални магнитопроводи без въздушна междина. [20, 170, 276, 278, 280] Като се имат предвид строгите норми за електромагнитни излъчвания, както и за допустимите ниски нива на „възприемчивост“ на смущения на тези устройства, в много случаи дроселите с магнитопровод с линеен хистерезисен цикъл без въздушна междина са предпочитани. Характеристиките им се определят основно от магнитните характеристики на феромагнитния материал на магнитопровода [274, 276, 278, 280]. Той трябва да отговаря на определени изисквания и преди всичко да бъде линеен, т.е. индуктивността на дросела да не зависи от тока, протичащ през него. Проектирането на тези дросели има определени особености. Тук е изследвано приложението на лентови магнитопроводи от аморфни метални сплави за линейни дросели без въздушна междина. Линеаризацията на характеристиките на дросела се дължи на линейната характеристика на материала на магнитопровода в работна му зона [274, 276, 278, 280].

4.2.1. Основни съотношения

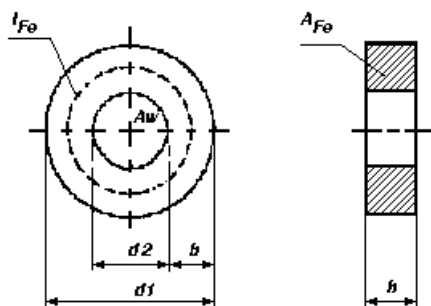
Основните параметри на дроселите, които служат и за изходи величини при проектирането, са:

L - индуктивност на дросел, H;

I_n – ефективна стойност на тока през дросела, A

k_a - коефициент на амплитудата на тока, който зависи от режима на работа на дросела.

Съотношенията на тороидалният магнитопровод са съобразени със стандарт DIN 42 311:1980-01 (IEC 60635: 1978), отнасящ се до лентови тороидални магнитопроводи от магнитно меки материали и са дадени на Фигура 4.1. [104].



Фигура 4.1 Основни димензионни размери на тороидални магнитопроводи

d_1 - външен диаметър на магнитопровода, mm; d_2 - вътрешен диаметър на магнитопровода, mm; h - височина на магнитопровода (зависи от ширината на лентата), mm; b - дебелина на магнитопровода, mm; A_{Fe} - напречно сечение на магнитопровода, mm²; l_{Fe} - средна дължина на магнитната силова линия, mm; A_w - площ на прозореца на магнитопровода, mm²;

/4.14/

$$L \cdot k_a^2 \cdot I_n^2 = H_s \cdot B_s \cdot V_{Fe}$$

Израз 4.14 е твърде характерен за проектирането на линейни дросели с магнитопровод без въздушна междина. Той показва, че основните параметри на дросела еднозначно определят и обема на магнитопровода. Този обем зависи обратно пропорционално от произведението $B_s \cdot H_s$. Подходящите материали в случая трябва да имат възможно най-голямо произведение $B_s \cdot H_s$. Това е възможно единствено при материали с хистерезисен цикъл тип F.

/4.16/

$$d_2 = \sqrt[4]{\frac{8 \cdot k_a \cdot I_n^2 \cdot L}{k_2 \cdot (k_1 - 1) \cdot k_1^2 \cdot \pi \cdot \eta_{Fe} \cdot \eta_{Cu} \cdot \Delta \cdot B_s}}$$

Изразът 4.16 е специфичен за проектирането на линейни дросели с магнитопровод без въздушна междина. Той показва, че основните параметри на дросела еднозначно определят и обема на магнитопровода.

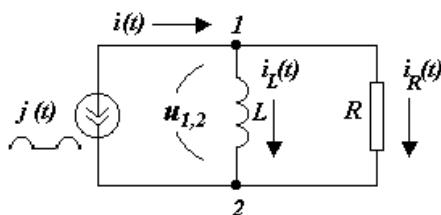
4.3. Приложения в токови трансформатори при постоянна компонента във възбуждащия ток

4.3.1. Теоретична постановка на проблема

Особеностите, които характеризират работата на този тип токови трансформатори са свързани с работата на трансформатора при несинусоиден режим [307-311, 313, 316, 321, 329, 334, 337-340].

Разглеждането се налага поради приложения, които изискват работа при еднополупериодно изправен първичен ток. Такова е например изискването на [105] по отношение на приложението на токови трансформатори в статични електромери. Подобно изискване се предявява и от [47] по отношение на сумиращите токови трансформатори в FI прекъсвачи или наричани още прекъсвачи, задействани от остатъчен ток. Особеностите, които характеризират работата на тези токови трансформатори при разглежданите условия произтичат от голямата постоянна компонента на първичния ток, при еднополупериодното му изправяне.

Направено е аналитично описание на физическите процеси, което доказва тезата, че при подходящо оразмеряване, токовете трансформатори могат да работят при наличие на постоянна компонента на тока през първичната намотка.



Фигура 4.2 Схема за анализ на процесите в ТТ при еднополупериоден захранващ ток.

Необходимото общо условие за работата им в такъв режим може да се обобщи въз основа на направеното разглеждане така:

❖ **намагнитващият ток на трансформатора трябва да е два пъти по-голям от приведената към първичната намотка средна стойност на постоянната компонента на първичния ток.**

Това условие може да се постигне, ако материалът на магнитопровода е с линеен хистерезисен цикъл тип F и магнитната му проницаемост е с определена стойност. Стойността на магнитната проницаемост μ_r на магнитопровода може да се определи от следните съотношения:

/4.39/

$$I_{1av}w_1 \leq \frac{1}{2} H_s l_{av}$$

/4.40/

$$\mu_r \leq \frac{B_s l_{av}}{2\mu_0 I_1 w_1}$$

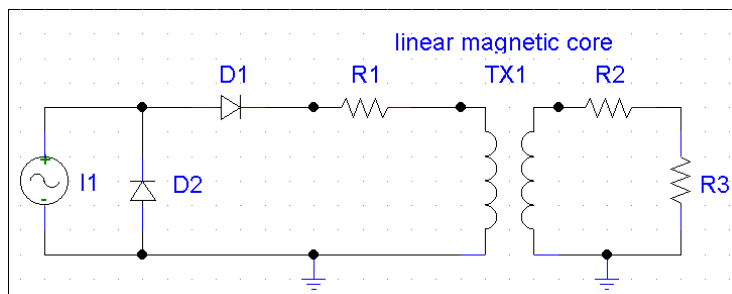
където:

B_s - магнитната индукция при насищане на магнитопровода,

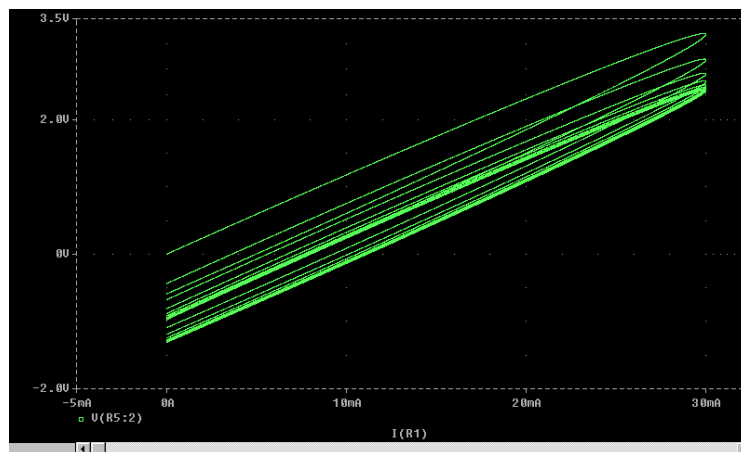
H_s – интензитет на полето при насищане на магнитопровода,

l_{av} средната дължина на магнитната силова линия на магнитопровода,

$I_{1av} \cdot w_1$ - произведението от постоянната компонента на първичния ток и броят на навивките на първичната намотка,



Фигура 4.4 Схема за моделиране на процесите с помощта на PSpice



Фигура 4.8 *Промяна на работната зона на магнитопровода по време на преходния процес решена с интегриращо звено.*

Анализът на процесите - преходни и стационарни, протичащи в ТТ, работещ при еднополупериодно изправен първичен ток с помощта на PSpice, потвърждава изместването на работната зона на магнитопровода поради наличието на постоянна компонента на първичния ток. Работната зона на магнитопровода се разполага несиметрично спрямо абсцисната ос. Това изместване не се извършва мигновено, а в продължение на няколко периода на тока. Преходният процес продължава докато площите, ограничени от кривата на тока, не се изравнят спрямо абсцисната ос. Тези резултати, са получени при анализ на преходния процес за магнитопровод с линеен хистерезисен цикъл, който е зададен в програмата за симулиране на процесите.

4.4. Приложения при несиметрични режими в магнитни ключове в системи за компресиране на магнитни импулси

Магнитни ключове за генериране на мощни токови импулси са изобретени за първи път от Мелвил през 1940 година и внедрени в радары във Великобритания [35]. Материалът е публикуван през 1951 година със заглавие “The Use of Saturable Inductors as Discharge Devices for Pulse Generators” – това са и първите системи за компресиране на магнитни импулси.

В системите за компресиране на магнитни импулси най-важен компонент е магнитният ключ. Той се състои от дросел с феромагнитна сърцевина. Всички препоръки за проектиране на магнитните ключове са да се изпълняват с магнитно меки материали с нелинейни магнитни характеристики тип “Z” или познатият правоъгълен хистерезисен цикъл [318].

Процесът на комутация се осъществява поради промяна на работната точка от хистерезисната крива на намагнитване на магнитопровода вследствие на насищане на феромагнитния материал. Магнитните ключове се характеризират с магнитна индукция на насищане и с точка на превключване. Необходимо е да се използват и размагнитващи намотки, които способстват за връщането на работната точка в изходното ненаситено състояние при несиметрични режими на работа [318].

Новата предложена концепция е използването на магнитни материали с линейни характеристики тип F или познатия линеен хистерезисен цикъл, при което размагнитващи намотки не са необходими за правилното функциониране на ключовете при несиметрични режими [145, 301].

Поради високата честота на изменение на работната точка на магнитопровода се работи с динамичните му характеристики. При това влияят и свойствата на самия магнитен материал като магнитна еластичност и вихрови токове, които са зависими и от геометрията и конструкцията на магнитопровода. Затова и в двата случая се използват магнитопроводи с тороидална форма с цел максимално оползотворяване на възможностите на материала [332].

Така може да се определи изчислителната мощност за дросели изработени от двата типа феромагнитни материали. В общия случай за изчислителната мощност може да се запише следния израз 4.54

/4.54/

$$P_{изч} = A_e A_w K$$

За магнитопроводи с правоъгълен хистерезисен цикъл – тип Z при наличие на размагнитваща намотка, при несиметрични режими на работа, изчислителната мощност се определя с израза 4.55:

$$/4.55/ \quad P_{изчZ} = A_e A_w K = \frac{\int u_1 dt}{w \Delta B_z} 2 \frac{wq}{k_3} K = \frac{\int u_1 dt}{1.95 B_s} 2 \frac{I}{jk_3} K = 1.02 \frac{I \int u_1 dt}{B_s k_3 j} K$$

За магнитопроводи с линеен хистерезисен цикъл – тип F без размагнитваща намотка, при несиметрични режими на работа, изчислителната мощност се определя с израза 4.56

$$/4.56/ \quad P_{изчL} = A_e A_w K = \frac{\int u_1 dt}{w \Delta B_z} \frac{wq}{k_3} K = \frac{\int u_1 dt}{0.95 B_s} \frac{I}{jk_3} K = 1.05 \frac{I \int u_1 dt}{B_s k_3 j} K$$

4.5. Изводи

4.5.1. Новите материали – аморфни и нанокристални сплави с линейни магнитни характеристики предоставят възможност за изработка на нов тип линейни дросели, елиминирайки нуждата от въвеждане на въздушни междини. Линеаризацията на характеристиките на дросела се дължи на линейната характеристика на материала на магнитопровода в работна му зона. По този начин производството им се опростява, съответните производствени разходи се намаляват и се получават по-благоприятни данни по отношение на електромагнитната съвместимост. Установено е, че чрез основните параметри на дросела се определя еднозначно обемът на магнитопровода му. Този обем зависи обратно пропорционално на произведението $B_s \cdot H_s$ и колкото по-голямо е това произведение – толкова по-подходящ е материалът за изработка на линейния дросел. Доказва се, че това се наблюдава единствено при материали с линеен хистерезисен цикъл или тип F.

4.5.2. Анализът на работата на ТТ при еднополупериодно изправен първичен ток доказва тезата, че те могат да работят при наличие на постоянна компонента в захранващия източник, ако материалът на магнитопровода отговаря на определени изисквания. Установено е, че това трябва да е материал, при който е изпълнено изискването намагнитващият ток на магнитопровода на трансформатора да е по-голям от приведената средна стойност на постоянната компонента на първичния ток. Само тогава могат да бъдат изпълнени и изискванията на съответните стандарти по отношение на ТТ, работещи при този режим.

4.5.3. Предложено е ново решение с използване на магнитни материали с линеен хистерезисен цикъл в магнитни ключове в системи за магнитно компресиране на импулси, работещи при несиметрични режими. С използването на тези материали се елиминира размагнитващата намотка, тъй като магнитопроводът може да се възвърне в първоначалното си работно състояние по естествен път. Получената стойност за изчислителната мощност на магнитопроводи с линейни магнитни характеристики е малко по-висока като стойност при равни други условия. Това ни дава основание да заключим, че е подходящо те да бъдат използвани в определени случаи с цел елиминиране на размагнитващата намотка при несиметрични режими на работа. При симетрични режими на работа работната точка на магнитопровода се възвръща в изходно положение и без размагнитваща намотка и ефективността от използването на магнитни материали с линейни магнитни характеристики не е обосновано. Подходящи материали с линейни характеристики са аморфните и нанокристални материали, тъй като при тях линеаризацията се постига чрез специална термообработка на самия материал преди или след получаването на готовия магнитопровод.

Глава 5 Приложения на аморфни метални сплави с раунд хистерезисен цикъл – тип R (ROUND)

5.1. Области на приложение

Хистерезисните цикли тип R са най-масово разпространени. Те се получават без да се прилага магнитно поле по време на тяхната термообработка. Поради това, те са по-прости за

производство. Всички класически приложения на трансформатори с магнитопроводи от електротехническа стомана и на трансформатори с феритни магнитопроводи използват хистерезисни цикли с тази форма.

5.2. Високочестотен трансформатор за DC/DC преобразувател

5.2.1. Същност на проблема при малки несиметрии в захранващото напрежение

В резултат от експериментални наблюдения върху работата на високочестотен трансформатор в DC/DC преобразовател с магнитопроводи от различни аморфни сплави се констатира, че една от възможните причини за несиметрия на захранващото напрежение е разликата във времената на превключване на отделните екземпляри транзистори в захранващата мостова схема. При това, колкото по-качествен е материалът на магнитопровода, толкова той е по-чувствителен дори и към малки несиметрии.

Това обстоятелство не е дискутирано в известната литература и не са оценени границите на влияние. Причината за това детайлно разглеждане тук е експериментално наблюдение.

Направена е разработка и е проведено експериментално наблюдение върху работата на трансформатор в инвертор в многоизходов DC/DC преобразувател с обща мощност 800VA и честота 40 kHz изпълнен за нуждите на БТК. Инверторът е проектиран със симетрично управление, но поради разликите в динамичните параметри на транзисторните ключове е наблюдавана малка несиметрия в захранващото напрежение на трансформатора.

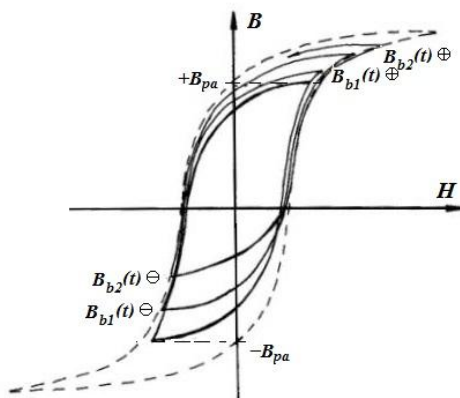
Първоначално трансформаторът е изпълнен с магнитопровод от аморфна сплав на кобалтова основа с много високи стойности на магнитната проницаемост - превишаващи 200 000 (марка 84KXCP) [341] При първоначално включване инверторът започна работа нормално и след няколко секунди се наблюдава изменение на звука при работа, увеличение на консумирания от източника ток и следващо изключване от защитата срещу претоварване или процесът завършва с повреда на транзистор.

След смяна на материала на магнитопровода на трансформатора със сплав с по-ниски параметри – марка 2НСР с типични стойности на магнитната проницаемост $\mu_r \sim 20\,000$, работата на комплекта се нормализира [342]. Това е повод за по-детайлно изследване на работата на трансформатори при високи честоти и при използване на материали с високи стойности на магнитната проницаемост.

Нека разгледаме работата на трансформатор при малки несиметрии в правоъгълното захранващо напрежение при повишена честота например в диапазон $20 \div 100\text{ kHz}$ Фигура 5.1.

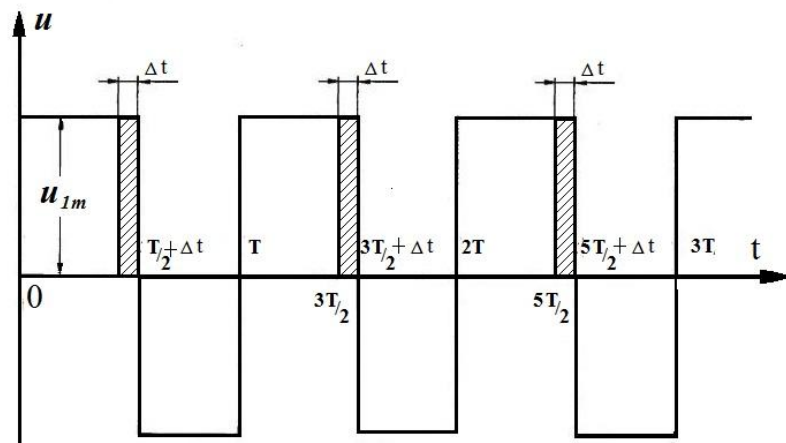
➤ Предполага се, че трансформаторът до момента “а” е работил при симетрично захранващо напрежение. Работната зона за магнитната индукция е била симетрична спрямо абсцисната ос. При това нека предположим, че магнитна индукция се е изменяла от $-B_{pa}$ до $+B_{pa}$

➤ Нека в момента “б” се появява несиметрия в захранващото напрежение. За улесняване на разглежданията приемаме, че тя е възникнала и се проявява в положителния полупериод. При това неговата продължителност е с Δt по – голяма от полупериода $T/2$.



Фигура 5.1

Средната стойност на напрежението за периода T , е различна от нула, а съответните средни стойности напрежението за положителния ($\oplus$) и отрицателния ($\ominus$) полупериод не са еквивалентни. Това ще доведе от своя страна до изместване на работната зона на магнитопровода спрямо абсцисната ос поради по – голямата продължителност на импулса в положителния полупериод. Това води до асиметрично намагнитване на магнитопровода на трансформатора. Процесът е илюстриран на Фигура 5.2.



Фигура 5.2

Работната зона на магнитопровода е силно изместена спрямо абсцисната ос, а материалът е асиметрично намагнетен. За материали с хистерезисен цикъл тип “R” или “F” може да се постигне компенсация на ΔB_i преди настъпване на насищане.

5.2.2 Съотношения за оразмеряване

Основните съотношения, които трябва да се имат предвид при оразмеряване на магнитопровода са 5.14 и 5.15. Коефициентът k_B се избира от проектанта в зависимост от конкретния случай.

$$/5.14/ \quad U_{1m} \frac{\Delta t}{T} \leq \frac{r_{ekb} \cdot l}{\mu_0 \cdot \mu_r \cdot \omega_1} \cdot \frac{1}{2} \cdot B_s \cdot (1 - k_B)$$

$$/5.15/ \quad U_{1m} \frac{\Delta t}{T} \leq \frac{r_{ekb} \cdot l}{\omega_1} \cdot \frac{1}{2} \cdot H_s \cdot (1 - k_B)$$

Прилагайки изложения подход, материалът на магнитопровода на трансформатора е заменен с материал с магнитна характеристика с относителна магнитна проницаемост $\mu_r \sim 20\,000$.



Фигура 5.3 Блокове в MUX 238

5.3. Изводи

5.3.1. Констатирано е, че различия във времената на включване и изключване на транзисторите от управляващите схеми за захранване на високочестотни трансформатори могат да предизвикат недопустими несиметрии за работата на трансформаторите, когато те са изпълнени от особено висококачествени магнитно меки материали, каквито са аморфните магнитно меки сплави;

5.3.2. Предложена е оценка и са посочени съотношения за компенсиране на възможни несиметрии в работата на високочестотните трансформатори чрез падовете в активните съпротивления на веригите на трансформаторите и препоръки за избор на материал за магнитопроводите на трансформаторите;

Глава 6 Приложения със съставни магнитопроводи

6.1. Области на приложение

Характеристиките на магнитопроводите могат да се видоизменят и подобряват, като се използват различни магнитни материали за изграждане на определен магнитопровод. Магнитопроводът може да се състои например от два тороида, поставени един до друг или един в друг [276, 280] Единият може да бъде с хистерезисен цикъл тип Z, а другият с тип F. Комбинации могат да се търсят също и при други съчетания - тип R и тип F; тип F1 и тип F2, и други според необходимостта да се получи общ хистерезисен цикъл със желана характеристика.

Типичен пример е трансформатор за електронни електромери, който от една страна трябва да работи с малка грешка при синусоидален ток, както и да работи с неголяма грешка при еднополупериодно изправен ток. Първото изискване може да се удовлетвори с магнитопровод с характеристика тип R или тип Z, а второто изисква обезателно линеен хистерезисен цикъл тип F с магнитна проницаемост определена по съотношението дадено в Глава 4.

6.2. Приложение на аморфни метални сплави в токови трансформатори за електронни електромери

Във връзка с изискванията на стандарт *БДС I7371-95* относно електромери статични (електронни) бяха разработени токови измерителни трансформатори на база на аморфни метални сплави. Грешките на токовите трансформатори при наличие на постояннотокова съставна в токовата верига трябва да бъдат по - ниски от 3%, което и наложи да бъде използван нов материал за магнитопровода, удовлетворяващ това изискване.

Магнитопроводът на токовия трансформатор е съставен и е изработен от два вида аморфни магнитно меки сплави, доставени под формата на лента [326] От тях се навиват поотделно с изолация два тороидални магнитопровода. Всеки един от готовите навити магнитопроводи се подлага на термомагнитна обработка, поставя се в защитна чашка и преминава през контролно изпитване на магнитните характеристики. Ако удовлетворява критериите се комплектува с магнитопровод от другия материал. Съставният магнитопровод преминава през ново контролно изпитване, и ако удовлетворява изискванията, се навива вторичната намотка на токовия трансформатор като отново се проверяват параметрите.

По-важните технически изисквания, на които трябва да отговарят разработените с аморфни метални сплави токови трансформатори за статични електромери са следните:

Размери - дължина 45mm, ширина 44 mm и височина 24 mm.

Активно съпротивление на вторичната намотка не по-голямо от 85Ω

Индуктивност да е по-голяма от 80H

Токови грешки:

При ток в първичната намотка $I_1=3A$ токът във вторичната намотка трябва да бъде $I_2 = (1.5 \pm 0.3\%) mA$

При ток в първичната намотка $I_1=60A$ токът във вторичната намотка трябва да бъде $I_2 = (30 \pm 0.3\%) mA$

Фазовата разлика между тока в първичната намотка $I_1=3A$ спрямо тока във вторичната намотка $I_2=1,5\text{ mA}$ трябва да е $(27\pm10)\text{min}$ - при честота 50Hz съответства на $(25 \pm 10\mu\text{s})$ или $(0,007854\pm0,002909)\text{rad}$;

Фазовата разлика между тока в първичната намотка $I_1=60A$ спрямо тока във вторичната намотка $I_2=30\text{mA}$ трябва да е $(16\pm5)\text{min}$ - при честота 50Hz съответства на $(15 \pm 5\mu\text{s})$ или $(0.004654 \pm 0.001454)\text{rad}$;

Грешките при наличие на постоянно токова съставна в токовата верига трябва да бъдат по - малки от 3%

При приложено напрежение $U_{AC} = 2500V$, между първичната и вторичната намотки в продължение на една минута да не настъпва пробив.

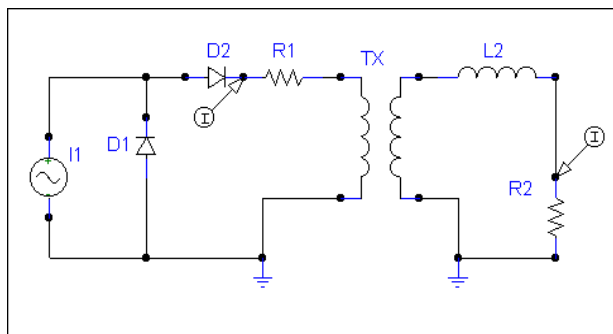
Приложението на токови трансформатори, работещи при еднополупериоден изправен първичен ток в електромери, предназначени за измерване на активната и реактивна енергия в еднофазни и трифазни мрежи за променлив ток с честота от 45 до 65 Hz и за линейно напрежение, е в основата на тази разработка.

6.2.1 Ъглова грешка на токови трансформатори при еднополупериоден изправен първичен ток

При несинусоидални величини за определянето на грешките на линейните токови трансформатори е предложено да се използват методите на хармоничния анализ. Ъгловата грешка на линейния токов трансформатор се определя чрез ъгъла на дефазиране между съответните хармоници на първичния и вторичния ток [313]. Целта е определянето на Ѫгловата грешка на токови трансформатори при еднополупериоден изправен първичен ток като се използва аналогичен подход. Задачата е решена като е направен е симулационен анализ с помощта на програмния продукт PSpice. Отчетено е влиянието на товара и промяната на стойността първичния ток. За определянето на Ѫгловата грешка на токовия трансформатор е използвана следната зависимост:

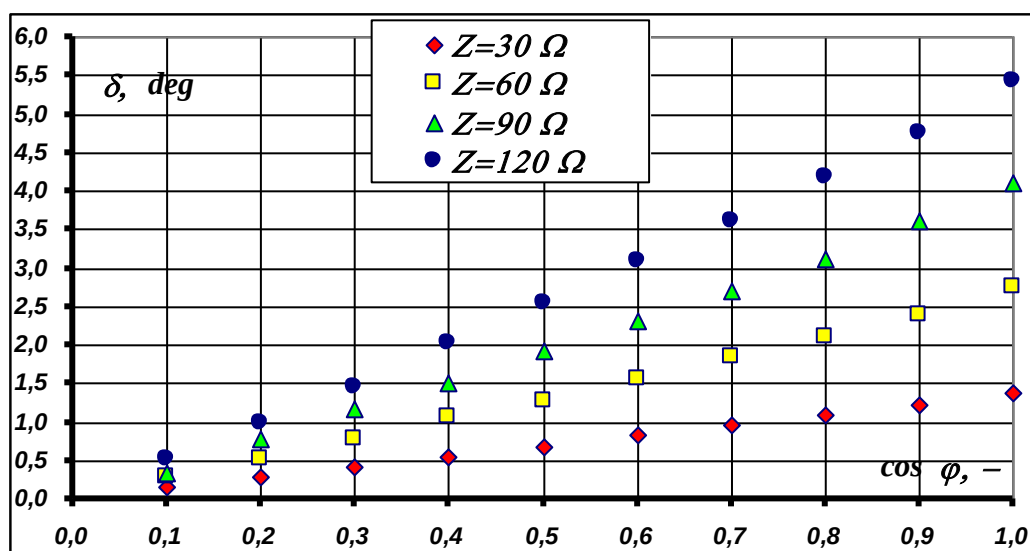
$$/6.1/ \quad \delta = \pm((180 + \varphi_2) - \varphi_1)$$

Изследванията на Ѫгловата грешка се провеждат чрез симулиране с програмния продукт PSpice. Изследваната схема, дадена на Фигура 6.1., е съставена на база на заданието на възложителя.

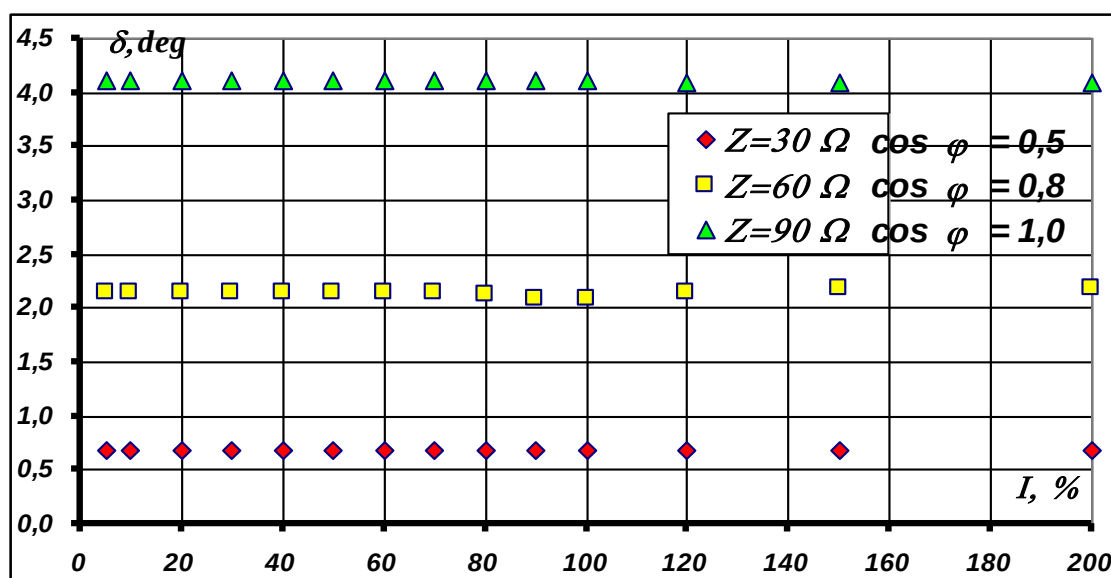


Фигура 6.1 Схема за определяна на Ѫгловата грешка на ТТ.

Данните за образца са взети от заданието на възложителя и напълно съответстват на внедрените и реално изследвани образци. Това са тороидални токови трансформатори, с навити от аморфна метална лента магнитопроводи. Използва се магнитно мек материал с линейен хистерезисен цикъл тип F с магнитна проникваемост $\mu_r = 2000$. Токовете трансформатори са изпълнени с една навика на първичната намотка и 2000 навивки на вторичната намотка. Получените резултати са представени с графични зависимости на Фигура 6.2., Фигура 6.3. и Фигура 6.4.



Фигура 6.2 Зависимост на ъгловата грешка на токовия трансформатор от $\cos \varphi$.



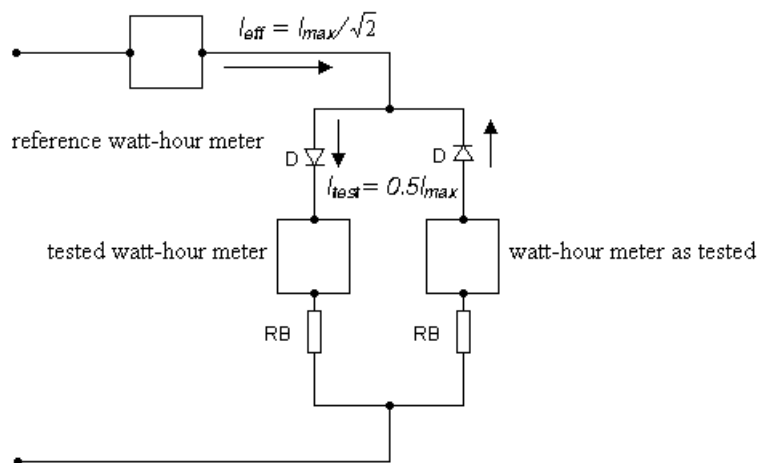
Фигура 6.3 Зависимост на ъгловата грешка на токовия трансформатор от промяната на първичния ток, при изменение на товара Z и $\cos \varphi$.

Изследванията, които са направени с приетия линеен модел на токовия трансформатор, отговарят на очакванията относно изменението на ъгловата грешка при промяната на стойността първичния ток и при промяна на големината и характера на товара. Установено е, че при промяна на първичния ток от 5% до 200% ъгловата грешка остава неизменна за различните товари при неизменен $\cos \varphi$. Тя нараства с увеличаване на стойността на товарното съпротивление и с увеличаване на коефициента на мощността. Ъгловата грешка е най-малка при $Z=30\Omega$, $\cos \varphi=0,1$ и максимална при $Z=120\Omega$, $\cos \varphi=1$.

6.2.2. Грешка по мощност на токови трансформатори при еднополупериоден изправен първичен ток

За да се опишат напълно токовите трансформатори, работещи при несинусоиден режим са направени още изследвания свързани с определянето на токовата им грешка и грешката им по мощност. Както бе отбелязано, в известната литература това не е дискутирано и разглеждано подробно. Целта е да се определят тези две грешки. Това се налага от специфичното им приложение - те са предназначени да работят в електромери за измерване на

активната и реактивна енергия в еднофазни и трифазни мрежи за променлив ток с честота от 45 до 65 Hz. Относно свързаните чрез токови трансформатори електромери в стандарта е заложено изискване по отношение на допустимата основна грешка при постоянна съставка в токовете вериги. Дефинирана е и грешката по мощност на токови трансформатори при еднopolупериодно изправен първичен ток. Задачата, която трябва да бъде решена е анализ на процесите, който е проведен с помощта на програмния продукт PSpice, както и с експериментални изследвания.

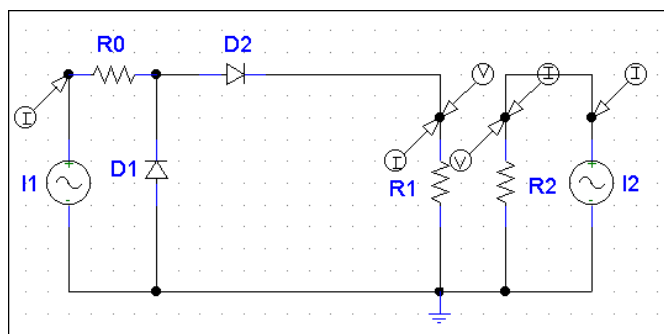


Фигура 6.5 *Опитна постановка за определяне на грешката на електронни електромери при еднopolупериодно изправен първичен ток.*

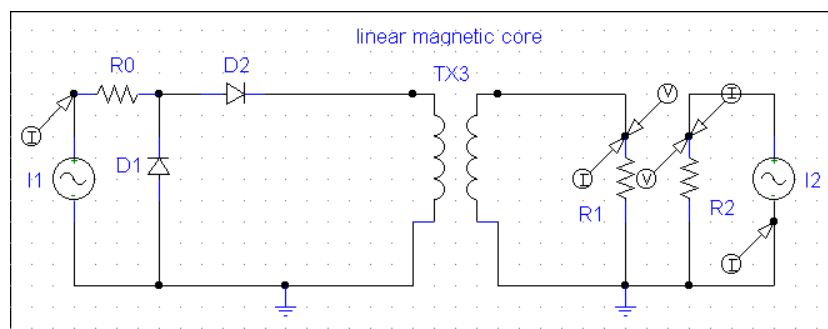
Към схемата са поставени следните изисквания:

1. Уравновесяващият импеданс трябва да бъде равен на импеданса на изпитвания електромер или да е заместен с електромер от същия тип.
2. Влиянието на постоянната съставка във веригата с променлив ток трябва да бъде изпитвано при $0,5I_{\max}$. Това условие трябва да бъде осъществено с променлив ток $I_{\text{eff}} = I_{\max} / \sqrt{2}$, където $I_{\max}$ е максималния ток, означен на табелката на изпитвания електромер.

При това допустимата грешка на електронни електромери, свързани чрез токови трансформатори с клас на точност 1, е 3%, а за класове на точност 2 и 3 е 6%. Тя се определя при $\cos\varphi=1$ чисто активен; $\cos\varphi=0,5$ индуктивен; $\cos\varphi=0,8$ капацитивен товар. Като се имат предвид изискванията поставени към схемата се съставят две аналогични схеми за изследване на влиянието на постоянно токовата съставка с помощта на програмния продукт PSpice. Първата схема е съставена без ТТ - чрез нея са определяни средната стойност на активна мощност отчетена от изпитвания електромер $P_{\text{test}} - \text{AVG}(V(R2:2)*I(R1))$, както и средната стойност на активната мощност на еталонния електромер $P_{\text{total}} - \text{AVG}(V(R2:2)*I(I1))$. (Фигура 6.6.) Втората схема е с ТТ - чрез нея са определяни активната мощност отчетена от изпитвания електромер при наличие на ТТ $P_{\text{testCT}} - \text{AVG}(V(R2:2)*I(R1))$, както и средната стойност на активната мощност на еталонния електромер $P_{\text{total}} - \text{AVG}(V(R2:2)*I(R1))$. (Фигура 6.7.)



Фигура 6.6 *Схема за определяне на активните мощности без ТТ*



Фигура 6.7 Схема за определяне на активните мощности с ТТ.

И в двете схеми е използван източник на синусоиден ток като захранващ източник и два диода, чрез които се симулира еднополупериоден режим във веригата. Зададените стойности на елементите във веригата са базирани на предварителни изчисления на експериментални образци, които са съобразени с изискванията на стандартите. Заместващата схема, по която се симулира работата на изпитвания електромер се състои от източник на еднополупериоден изправен ток и източник на синусоидално напрежение, представен от източник на ток и съпротивление.

Грешката на изпитвания електронен електромер ε_{PEM} се определя чрез израза:

$$/6.2/ \quad \varepsilon_{PEM} = \frac{P_{test} - 1/2 P_{total}}{1/2 P_{total}} \cdot 100, \%$$

където:

P_{test} - средна стойност на активната мощност, измерена чрез тествания електромер

P_{total} - средна стойност на активната мощност, измерена чрез еталонен електромер

Грешката на изпитвания електронен електромер свързан с ТТ ε_{PEMCT} се определя чрез израза:

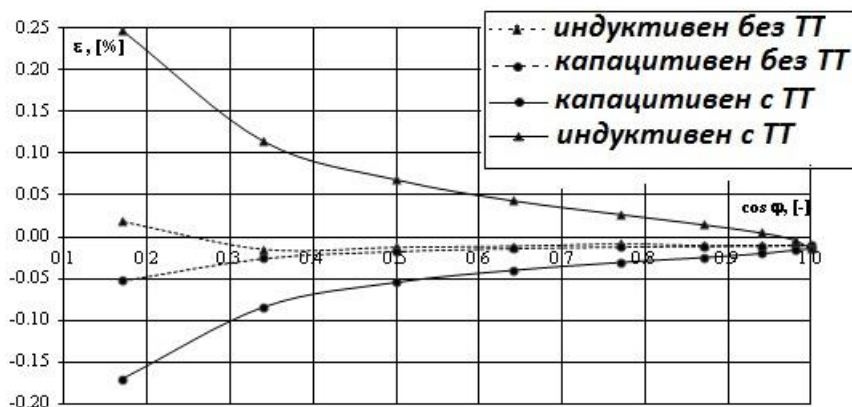
$$/6.3/ \quad \varepsilon_{PEMCT} = \frac{P_{testTT} - 1/2 P_{total}}{1/2 P_{total}} \cdot 100, \%$$

където:

P_{testTT} - средна стойност на активната мощност измерена чрез тествания електромер при наличие на токов трансформатор

Грешката на токовия трансформатор по мощност при еднополупериодно изправен първичен ток се определя като разлика на двете грешки:

$$/6.4/ \quad |\varepsilon_{PCT}| = |\varepsilon_{PEMCT} - \varepsilon_{PEM}|, \%$$



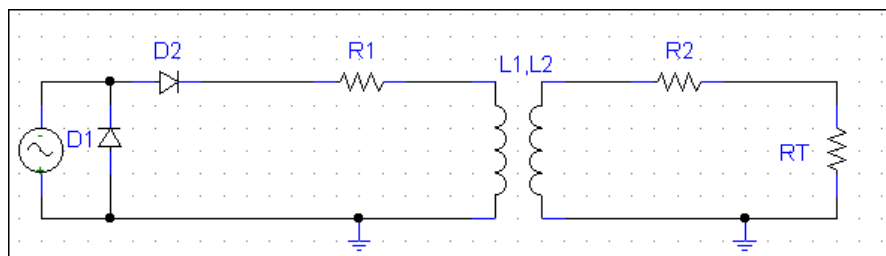
Фигура 6.8 Грешки на изпитвания електронен електромер свързан без и с ТТ.

6.2.3. Токова грешка на токови трансформатори при еднополупериоден изправен първичен ток

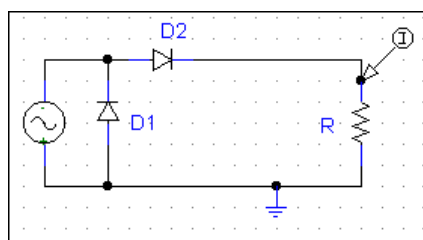
Целта е дефинирането и изследването на влиянието на феромагнитния материал на магнитопровода върху токовата грешка на токови трансформатори при еднополупериодно изправен първичен ток. На тази основа се обосновават и критерии за избор на подходящ материал за магнитопровода на трансформатора. За да се изпълни поставената задача е необходимо да се направи симулационен анализ с помощта на програмния продукт PSpice. Резултатите са съпоставени с експериментални данни за грешката на токови измервателни трансформатори.

Използвани са схемите дадени на Фигура 6.12. и Фигура 6.13. За пресмятане на токовата грешката на ТТ при еднополупериодно изправен първичен ток ε се използва изразът даден по-долу, който показва процентното отклонение на получения експериментален ток I_2 (изчислен) спрямо теоретичния I_{2T} .

При периодично несинусоидално входно въздействие изследването на процесите се извършва с помощта на методите на хармоничния анализ. Определян е първия хармоник на вторичния ток на токовия трансформатор с помощта на анализ на Фурие. Той има значение при определяне на електрическата мощност и енергия в електронните електромери.



Фигура 6.12 Схема за определяна на експерименталния ток I_2 (измерен).



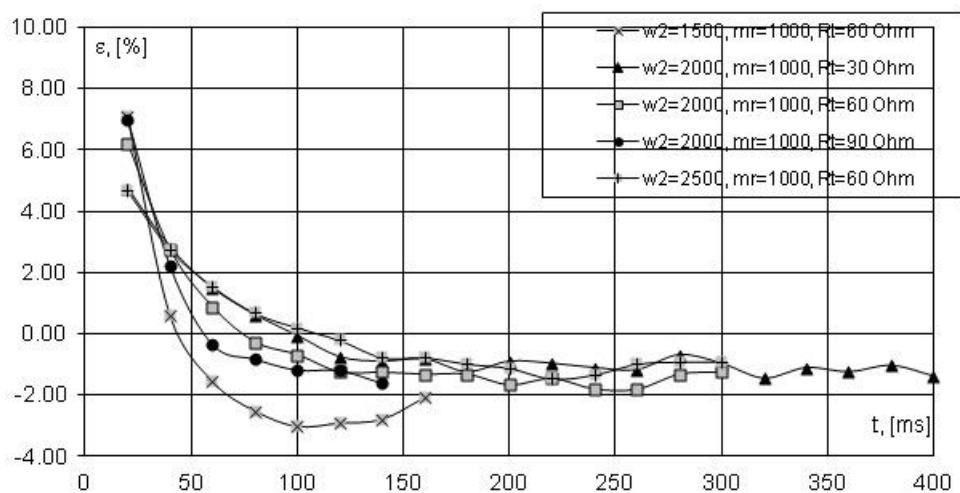
Фигура 6.13 Схема за определяна на теоретичния ток I_{2T} (изчислен).

/6.5/

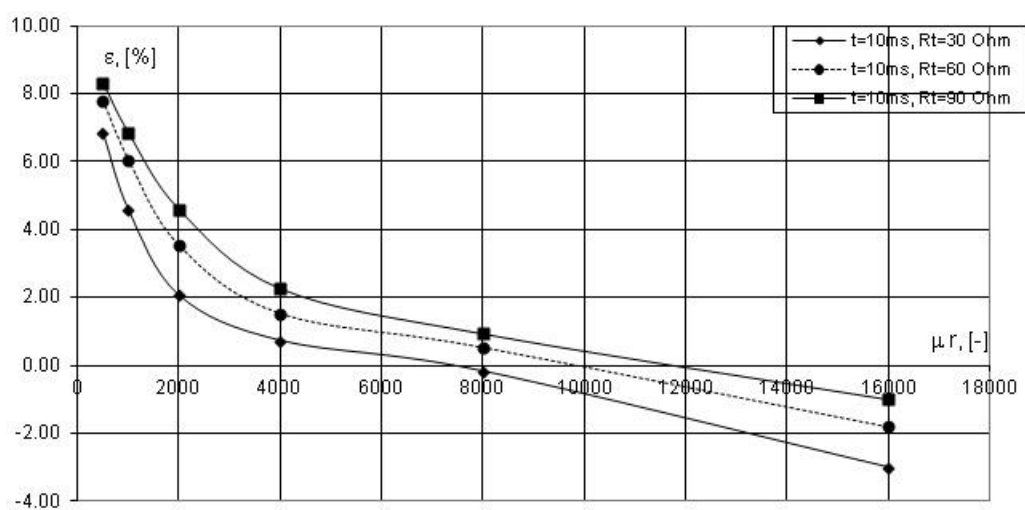
$$\varepsilon = \left(\frac{I_2 - I_{2T}}{I_{2T}} \right) \cdot 100, [\%]$$

За пресмятане на токовата грешката на ТТ при еднополупериодно изправен първичен ток ε се използва изразът даден по-долу, който показва процентното отклонение на получения експериментален ток I_2 (изчислен) спрямо теоретичния I_{2T} .

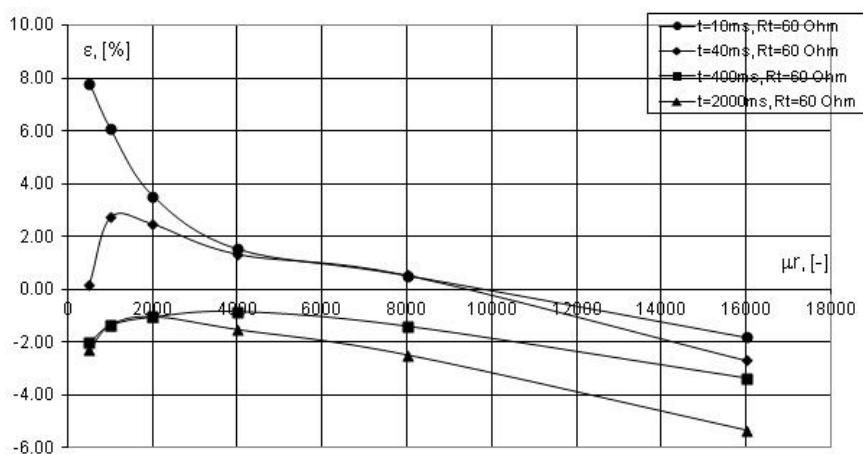
Направени са изследвания на ТТ с линейна и нелинейна характеристика като е определяна грешката на тока от времето Фигура 6.14, при различни стойности на магнитната проницаемост на материала Фигура 6.15 и Фигура 6.16, различен брой навивки на вторичната намотка и различни стойности на товарното съпротивление на ТТ. Съпоставени са резултатите с експериментални данни от реални образци Фигура 6.18.



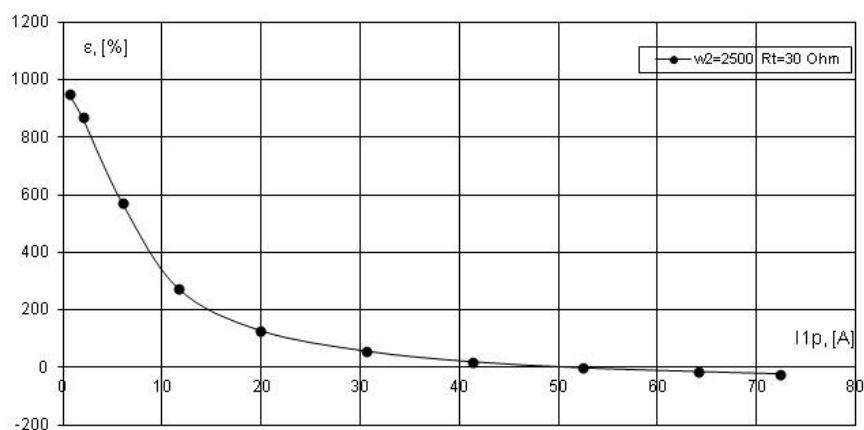
Фигура 6.14 Токова грешка в зависимост от времето.



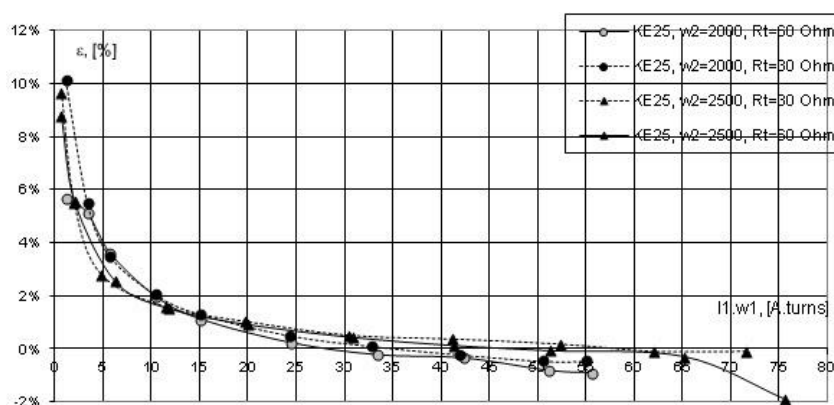
Фигура 6.15 Токова грешка в зависимост от относителната магнитна проницаемост.



Фигура 6.16 Токова грешка в зависимост от относителната магнитна проницаемост за различни времена ($t=10, 40, 400$ и 2000ms).



Фигура 6.17 Токова грешка на токов трансформатор с магнитопровод от материал с правоъгълен хистерезисен цикъл в зависимост от приведения първичен ток (I_{1p}).

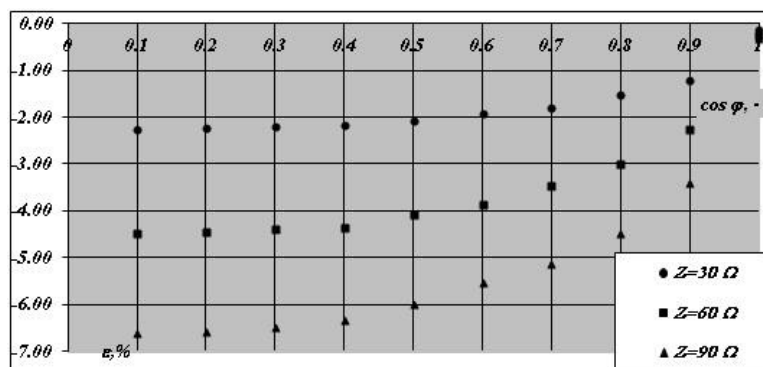


Фигура 6.18 Токова грешка на реални токови трансформатори с магнитопроводи с линейни магнитни характеристики.

6.2.4. Изследване на влиянието на товари върху токовата грешка на ТТ при еднополупериоден изправен първичен ток

Изследвано е влиянието на токовата грешка на ТТ при различни товари – активно-индуктивен като е направен параметричен анализ с PSpice.

$$\varepsilon_i = \frac{I(R2)_1 - I(R1)_1}{I(R1)_1} \cdot 100, \%$$



Фигура 6.19 Грешка на токови трансформатори с активно-индуктивен товар.

6.2.5. Проверка на някои параметрите и данни от измервания на ТТ за еднофазни електромери

Данни от измерванията са дадени в Таблица 6.1.

Таблица 6.1 Данни от измерване на ТТ за електромери статични

	№	№	№	№	№	№	№	№
Параметър	K1-46	K1-43	K1-55	K1-44	K1-66	K1-53	K1-58	K1-65
R, Ω	76,00	76,40	75,80	75,80	75,60	77,50	77,40	76,30
L, H	205	162	260	190	255	190	168	180
$\varphi_{3A}, \mu S$	17,00	18,50	20,00	22,00	21,00	19,00	18,00	16,00
$\varphi_{3A}, \min$	18,36	19,98	21,60	23,76	22,68	20,52	19,44	17,28
$\varphi_{60A}, \mu S$	7,00	8,00	9,00	11,00	10,00	9,00	9,00	7,00
$\varphi_{60A}, \min$	7,56	8,64	9,72	11,88	10,80	9,72	9,72	7,56
$\varepsilon_{\sin}, \%$	0,60	0,70	2,50	0,35	0,77	1,20	0,71	0,84
$\varepsilon_{\sin}, \%$	0,25	0,27	0,30	0,15	0,21	0,18	0,25	0,27
	№	№	№	№	№	№	№	№
Параметър	K1-90	K1-100	K1-30	K1-104	K1-105	K1-78	K1-95	K1-98
R, Ω	77,2	77,4	77,2	80,0	79,2	78,3	80,0	79,2
L, H	160	200	150	120	275	185	250	240
$\varphi_{3A}, \mu S$	25,00	30,00	27,00	22,00	19,00	30,00	26,00	20,00
$\varphi_{3A}, \min$	27,00	32,40	29,16	23,76	20,52	32,40	28,08	21,60
$\varphi_{60A}, \mu S$	15,00	16,00	15,50	10,00	5,00	15,00	13,00	12,00
$\varphi_{60A}, \min$	16,20	17,28	16,74	10,80	5,40	16,20	14,04	12,96
$\varepsilon_{\sin}, \%$	0,43	1,07	1,60	0,95	1,30	0,30	1,16	0,99
$\varepsilon_{\sin}, \%$	0,25	0,28	0,16	0,20	0,22	0,29	0,27	0,19

6.3. Изводи

6.1. Предложено е, противоречивите изисквания към токовите трансформатори за електронни статични електромери за работа и при синусоидален и при еднополупериодно изправен първичен ток, да се изпълнят със съставен магнитопровод от две различни сплави – едната с хистерезисен цикъл тип R, а другата с хистерезисен цикъл тип F;

6.2. При проектирането частта на съставния магнитопровод с характеристика тип R се оразмерява така, че да се удовлетворят изискванията за работа при синусоидален ток. Частта с характеристика тип F се оразмерява в съответствие с изискванията за работа при еднополупериодно изправен ток;

6.3. Разработеният токов трансформатор е внедрен в електромери на три фирми – завод Електроника гр. София, фирма на маг. инж. Пл. Манчев и фирма на маг. инж. Д. Идакиев, при общо количество над 1000 бр. Отзивите за работата на електромерите и на трите производителя са много добри.;

Научно-приложни приноси

1. Разработена е серия от магнитопроводи от аморфни магнитно меки сплави, въз основа на технологии за изолиране, навиване, термомагнитна обработка и изпитване на характеристиките им;
2. Предложена е методика за проектиране на линейни дросели без въздушна междина с магнитопроводи с характеристика тип F;
3. Изследвани са условията, при които токови трансформатори, могат да работят с постоянна компонента в първичния ток, изведени са изрази за определяне на необходимите характеристики на магнитните материали за магнитопроводите им;
4. Изследвана е работата на магнитни ключове при повишени честоти в DC/DC преобразователи, разработена е методика за тяхното проектиране с отчитане на температурния им режим и те са внедрени в захранвания на телексни мултиплексори в околните подразделения на БТК.
5. Изследвана е работата на трансформатори с аморфна магнитно мека сплав във високочестотни DC/DC преобразователи при малки несиметрии в захранващото напрежение и е показано, че използването на сплави с високи стойности на магнитната проницаемост е противопоказано. Дадени са критерии за оценка и препоръки за подобряване на работата;
6. Изследвани, проектирани и са внедрени токови трансформатори за електронни статични електромери със съставни магнитопроводи;
7. Предложено е в системи за магнитно компресиране на импулси при несиметрични режими на работа, магнитопроводите с характеристики тип Z да бъдат заменени с магнитопроводи с характеристики тип F.

Списък на отпечатаните научни трудове, свързани с дисертационния труд

1. **Минчев, М., Дечев, М., Славкова, М.** Гама тороидални магнитопроводи от аморфни магнитно меки сплави, SIELA'97, Plovdiv, May 30-31, 1997, pp. 143-148
2. **Mintchev, M., Slavkova, M.** An Investigation of Linear Iron-Core Chokes without Air-Gaps, JBMSAEM'98, Sofia, September 14-15, 1998, pp. 299-304
3. **Минчев, М., Славкова, М.** Приложение на аморфна метална сплав във високочестотен трансформатор за DC/DC преобразувател при малка несиметрия в захранващото напрежение, SIELA'99, Plovdiv, May 27-28, 1999, pp. 148-153
4. **Slavkova, M., Milanov, K., Mintchev, M.** Magnetic Amplifiers with Toroidal Cores Based on Amorphous Soft Magnetic Materials, SIELA'2001, Plovdiv, May 31-June 1, 2001, pp. 120-126
5. **Slavkova, M., Mintchev, M.** Operational Performance of Current Transformers with Half-Wave Rectified Primary Current, ELMA'2002, Sofia, September 13-14, 2002, pp. 124-131
6. **Славкова, М.** Ъглова грешка на токови трансформатори при еднополупериодно изправен първичен ток, Електротехника и електроника, 3-4, 2006, стр. 51-53
7. **Славкова М., Миланов, К., Минчев, М.** Изследване на магнитни ключове с аморфни и нанокристални материали, Годишник на Технически университет – София, Том 63, книга 6, 2013, стр. 119-124

APPLICATION OF AMORPHOUS SOFT MAGNETIC ALLOYS IN ELECTRICAL APPARATUS AND CONVERTERS

ABSTRACT

The amorphous metal alloys are relatively new materials in comparison with the classical crystalline soft magnetic alloys. The unique characteristics and the price, which is already comparable to that of the previously known conventional soft magnetic crystalline alloys, make them competitive in a number of devices. In some of them it is the only possible material for their production. This requires a research in the field of delimitation of their application in electrical apparatus and converters.

This PhD thesis explores the problems of application of magnetic alloys with amorphous structure in electrical apparatus and converters. The presented studies have been performed in a relatively long period of time and they affect not only the problems of application, but also typical for the initial period research studies on design and technological problems of production of magnetic cores made of amorphous soft magnetic alloys.

The main objective of the thesis is to conduct research and to create conditions for leveling up the knowledge on the application of amorphous soft magnetic alloys in electrical apparatus and converters. Studying the appropriate criteria aims to direct the research in the area of applications and new development.

In the first chapter, a short historical reference to the amorphous soft magnetic alloys is made. The main properties and characteristics of the materials are discussed depending on the type of their thermal or thermo-magnetic treatment. A classification of their possible applications is made based on the type of their hysteresis loop.

The second chapter is devoted to the design and technology of production of series of toroidal strip wound cores made of amorphous soft magnetic alloys. A brief description of the different modules associated with the technological process of manufacturing the toroidal strip wound cores is made. A block diagram of the production line for coating the insulation layer of the amorphous strip is presented.

In the third chapter, the application of saturable chokes produced with magnetic cores made of amorphous soft magnetic alloys with a rectangular hysteresis loop, is discussed. They are embedded in high frequency DC/DC converter. The specific characteristics in the design of saturable chokes are analyzed and also design considerations for selecting the appropriate material for the magnetic core are given.

In the fourth chapter the applications based on magnetic cores made of amorphous soft magnetic alloys with linear characteristics are presented. These are linear ferromagnetic core chokes, current transformers with a dc component in the primary current and magnetic switches used in magnetic pulse compression systems. Ratios for the design of the linear ferromagnetic core chokes and magnetic switches are deducted. The prerequisite for the operation of current transformer with dc component in the primary current is defined. It is proved that for the proper operation of magnetic switches in the asymmetrical mode, they can be produced with magnetic cores with linear characteristics and in this case the demagnetization coils are not necessary.

In the fifth chapter the application of transformer with magnetic core made of amorphous soft magnetic alloy with round hysteresis loop is discussed. It is embedded in inverter for a DC/DC converter with many outputs with a total power of 800VA and a frequency of 40 kHz. A small imbalance in the supply voltage of the transformer is observed, because of differences in the dynamic parameters of transistor switches. It is compensated by using a magnetic core for the transformer made of amorphous soft magnetic alloy with round hysteresis loop and relative permeability of about 20 000.

In the sixth chapter the application of mixed cores made of different types of amorphous soft magnetic alloys for current transformers for static electricity meters (electronic) is discussed. The phase displacement, the power error and current error at half wave rectified primary current of these current transformers are studied theoretically and via simulation. Measurement data are presented in graphical and tabular form.