

DESIGN OF RELIABLE PULSE TRANSFORMERS

Anton Slavchev Georgiev, Medical University of Varna, georgiev_an@yahoo.com

Rosen Nikolov Vassilev, Medical University of Varna, rosen.vasilev@mu-varna.bg

Angel Zahariev Toshkov, Burgas Free University, angel_toshkov@abv.bg

Kalin Hristov Yankov, Technical University of Varna, kalin.yankov@gmail.com

Julia Georgieva Garipova, Technical University of Varna, juliq.garipova@tu-varna.bg

Abstract: The article analyzes the possibilities for designing pulse transformers with high reliability. For this purpose, possibilities for optimizing the shape and material of the magnetic circuit of these transformers are proposed. A way of choosing a suitable type and diameter of the windings of the coils, as well as the number of windings in the coils is analyzed. The results of the testing of pulse transformers designed according to the presented methodology are presented, analyzed and evaluated.

Keywords: reliability of electronic equipment, design of pulse transformers, design of transformers.

ПРОЕКТИРАНЕ НА НАДЕЖДНИ ИМПУЛСНИ ТРАНСФОРМАТОРИ

Антон Славчев Георгиев, Медицински университет - Варна, georgiev_an@yahoo.com

Росен Николов Василев, Медицински университет - Варна, rosen.vasilev@mu-varna.bg

Ангел Захариев Тошков, Бургаски Свободен Университет, angel_toshkov@abv.bg

Калин Христов Янков, Технически университет - Варна, kalin.yankov@gmail.com

Юлия Георгиева Гарипова, Технически университет - Варна, juliq.garipova@tu-varna.bg

Абстракт: В статията се анализират възможностите за конструиране на хранващи импулсни трансформатори с висока надеждност. За тази цел са предложени възможности за оптимизиране на формата и материала на магнитопровода на тези трансформатори. Разгледан е начин за избиране на подходящ тип и диаметър на навивките на намотките, както и броя на навивките в намотките. Представени, анализирани и оценени са резултати от изпитването на проектирани по представената методика, импулсни трансформатори.

Ключови думи: надеждност на електронни апаратури, конструиране на импулсни трансформатори, конструиране на трансформатори.

Специфика на проблема

Импулсни са трансформаторите (ИТ-ри), при които входните и изходните сигнали (напрежения) имат импулсен характер. Те служат за: галванично разделяне на импулсни вериги, съгласуване на съпротивлението на електрически импулсни вериги, обръщане полярността на импулси и осигуряване на постоянна амплитуда на импулсите при изменение на товара.

Многобройните предимства, които премижават ИТ-ри ги превърна в неотменна част от съвременните електронни апаратури. Приложението им е твърде разнообразно, но най-

широко приложение днес те намират в хранящите блокове на електронните системи. В това си амплуа, те все по-често изместват маломощните мрежови трансформатори. За сега, все пак маломощните мрежови трансформатори продължават да се използват и все още не могат напълно да бъдат изместени поради един съществен недостатък на ИТ-ри, а именно тяхната неуниверсалност. За хранящите маломощни мрежови трансформатори, при които по правило честотата на хранящото синусоидално напрежение е стандартна (50Hz, 60Hz, 400Hz и др.), напрежението на изхода им е фиксирано при работа с всички мощности (всички товари), непревишаващи мощността за която са проектирани. За разлика от тях, за да работят надеждно и да притежават желаните параметри, хранящите импулсни трансформатори трябва да се проектират за конкретното им приложение – за конкретната честота на повторение на импулсите в импулсната поредица и за конкретната амплитуда и дължина на импулсите. Това превръща проектирането на надеждни импулсни трансформатори в отговорна, нетривиална задача.

Общи характеристики на импулсните трансформатори

Импулсните трансформатори влизат в състава на различни генератори на електрически импулси, изпълнявайки функциите на съгласуващо звено между генератора и съпротивлението на товара. Както генераторът на импулси, така и товарът се характеризират с параметри, които заедно с параметрите на ИТ определят условията за предаване на импулсна енергия от генератора към товара. Затова при проектирането на трансформатора задължително трябва да се отчитат и параметрите на източника на импулсен сигнал (R_i и E) и на товара R_2 . Вътрешният импеданс на източника на импулси и импедансът на товара най-често имат капацитивен характер. Рядко се отчитат индуктивните компоненти на тези импеданси [1].

В зависимост от полярността на импулсите с които работят, ИТ-ри могат да бъдат за монополярни или за биполярни импулси (част от импулсите са с положителен, а друга част - с отрицателен поляритет). При конструирането на ИТ не е от съществено значение дали той ще работи с монополярни или биполярни импулси.

Към ИТ-ри най-често се поставят две основни изисквания - *да предават импулсите с минимално изкривяване*, също така и с *минимална загуба на мощност*.

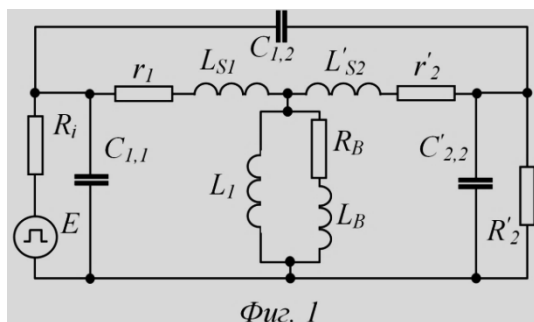
Върху работата на ИТ влияние оказват индуктивността на разсейване и капацитивните връзки между конструктивните му елементи [2]. Важен параметър за работата на всеки ИТ е импулсната магнитна проницаемост μ_Δ , изразяваща отношението между изменението на индукцията в магнитопровода и изменението на интензитета на полето

$$(1) \quad \mu_\Delta = \frac{1}{\mu_0} \frac{\Delta B}{\Delta H}.$$

Важна отправна точка при избора на магнитопроводи и на материал за него е постулата, че колкото по-голяма е стойността на остатъчната индукция B_0 в магнитопровода, толкова по-малко е нарастването на индукцията в него и толкова по-малка е магнитната проницаемост на съответния частен хистерезисен цикъл, т.е. толкова по-неефективно се използва магнитопроводът на трансформатора. Но по-ефективното използване на магнитопровода изисква по-голям брой навивки на първичната намотка W_1 за да се получи необходимата индуктивност на първичната намотка. По-големият брой навивки на първичната намотка от своя страна повишава индуктивността на разсейване и паразитните капацитети на трансформатора, като в същото време го прави по-скъп, по-тежък и по-обемист. Затова при работа в импулсен режим без външно размагнитващо поле се предпочитат феромагнитни материали с малка остатъчна индукция, голяма стойност на индукцията на насищане B_s и минимална стойност на напрегнатостта на магнитното поле

при която се достига индукцията на насищане. Феромагнитен материал с такива свойства притежава едновременно и голямо нарастване на индукцията и висока магнитна проницаемост. За съжаление, дори добрите реално съществуващи феромагнитни материали имат стойност на остатъчната индукция B_0 , равна на половината от индукцията на насищане B_s . Затова в практиката се използват методи за изкуствено намаляване на остатъчната индукция B_0 . По-широко приложение са намерили два метода: въвеждане в магнитопровода на въздушна междина и размагнитване на магнитопровода с помощта на специално създадено размагнитващо поле. По-ефективен е вторият метод. При него електромагнитните свойства на магнитопровода се използват максимално.

При проектиране на ИТ е необходимо да са зададени: върховата стойност на тока във вторичната намотка I_m , А; напрежението на първичната намотка U_{1m} , V, относителният спад на напрежението върху товара в края на импулса $p = \Delta U/U_{2m}$; продължителността на импулса t_p , s; вътрешното съпротивление R_i на генератора (източника) на импулси ($R_i = U_{изх}/I_{изх}$) и товарното съпротивление R_2 , Ω , включено към вторичната намотка (в голяма част от изчисленията се ползва приведената стойност¹ на товарното съпротивление ($R'_2 = R_2/n^2$)). Еквивалентната схема на ИТ е показана на *фиг. 1*. Тя прилича на еквивалентната схема на нискочестотен трансформатор, но съдържа два допълнителни елемента - R_B и L_B , наричани съответно вихрово съпротивление и вихрова индуктивност. Те отразяват вихровите параметри на магнитопровода. При определена честота тези два



параметъра заедно с паразитния капацитет, създават условия за настъпване на нежелани резонансни явления. Останалите елементи в схемата са: E - електродвижещо импулсно напрежение; R'_2 - приведена стойност на товарното съпротивление; $C_{1,2}$ - междунамотъчен капацитет; $C_{1,1}$ и $C'_{2,2}$ - сумарен капацитет на първичната намотка и приведена стойност на сумарния капацитет на вторичната намотка [3].

Етапи в проектирането на надеждни импулсни трансформатори

Още в началото трябва се уточни един съществен за хода на проектирането факт, а именно, че проектирането на ИТ представлява математически неопределена задача – изходните данни са недостатъчни за определянето на всички параметри. Това налага първоначално някои от тях да бъдат ориентировъчно избрани – на базата на натрупаната през последните десетилетия априорна теоретично-емпирична информация. При такъв подход проектирането задължително трябва да завърши с контролни изчисления, съпоставящи получените резултати със зададените параметри. При несъответствие на резултатите със зададените параметри се извършва корекция на първоначално избраните стойности така, че параметрите на проектирания ИТ да попаднат в допустимите граници. Ориентировъчният избор на параметри, основаващ се на априорна информация, се извършва в **етапа на началните изчисления (ориентировъчните пресмятания)**. Сравняването на получените резултати със зададените параметри е обект на **етапа на контролните изчисления (проверовъчните пресмятания)**. Дори и след удовлетворяващи резултати от контролните изчисления, задължително се измерват параметрите на опитен образец на ИТ и ако параметрите му отговарят на зададените се престъпва към дребно серийно, едро серийно или масово производство. При измерени параметри, по-лоши от зададените, се извършва корекция на първоначално избраните стойности на величините, участващи в

¹ Привеждането на параметрите на вторичната намотка към тези на първичната се извършва понеже, преводното отношение n на трансформатора е различно от единица, а при анализа на векторната диаграма се възприема хипотезата за преводното отношение $n = 1$.

началния стадий на проектирането, така че реалните параметрите на ИТ да попаднат в допустимите граници.

Избор на магнитопровод и материал за него

Изборът на магнитопровод и материал от който той да бъде изработен, е основна съставна част от проектирането в етапа на началните изчисления. Този избор се предхожда от определяне на оптимален коефициент на трансформация и от изчисляване на индуктивността, която трябва да създава първичната намотка.

За уточняването на най-подходящата стойност за коефициента на трансформация n се използва изразът

$$(2) \quad n = U_{2m} / U_{1m} \cdot \eta,$$

където $\eta = 0,8 \div 0,9$ е коефициентът на полезно действие на трансформатора.

Индуктивността на първичната намотка на трансформатора L_1 оказва влияние върху изкривяването на платото на импулса. Тя се изчислява така, че изкривяването на платото да не превишава предварително зададена стойност (обикновено се изисква в края на импулса относителния пад P на напрежението върху товара да не превишава 5%, т.е. $P = \Delta U / U_{2m} \leq 5\%$). За целта се използва изразът

$$(3) \quad L_1 = \frac{R_e \cdot t_P}{P},$$

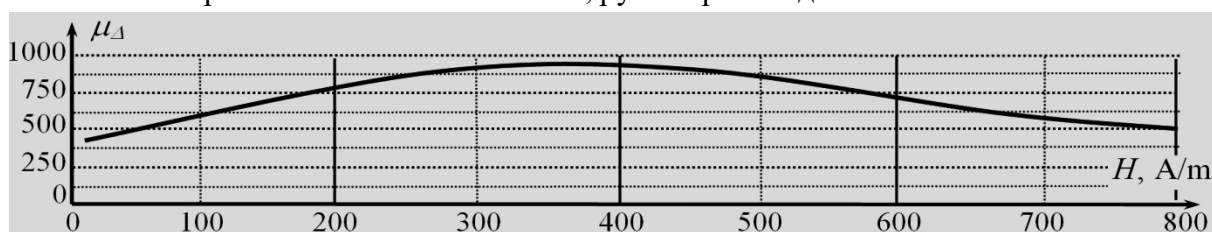
където еквивалентното съпротивление на ИТ се определя с помощта на приведената стойност на товарното съпротивление R'_2 и вътрешното съпротивление R_i на източника на импулси, и има стойност

$$(4) \quad R_e = R_i \cdot R'_2 / (R_i + R'_2).$$

След определянето на коефициента на трансформация и индуктивността на първичната намотка се пристъпва към многофакторно детерминиран избор на магнитопровод.

Магнитопроводите, използвани при производството на ИТ най-често са с П-образна или тороидална форма. Обикновено се изработват от феритен материал, но при определени условия (които ще бъдат анализирани по-нататък) е възможно да бъдат изработени и от листов електротехническа стомана (Э310 ÷ Э360) или пермалой (50НП и др.).

Както бе отбелязано стойността на импулсната магнитна проникваемост зависи от интензитета на магнитното поле и за всеки материал тя се определя експериментално (за конкретната амплитуда на импулсите, честота на импулсната поредица, продължителност на импулса и т.н.). На *фиг. 2* е показана тази зависимост за студеновалцуваната листов електротехническа стомана Э310, руско производство.



Фиг. 2. Зависимост на импулсната магнитна проникваемост μ_{Δ} от интензитета на магнитното поле при студеновалцувана листов стомана Э310

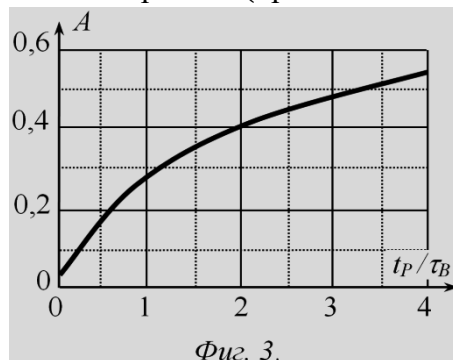
При импулсно намагнитване в листовия материал от електротехническа стомана или пермалой възникват вихрови токове, изкривяващи фронта на импулса и понижаващи импулсната магнитна проникваемост. За минимално изкривяване на фронтовете на изходните импулси, вихровите токове в магнитопровода трябва да са минимални. За ограничаване на влиянието на вихровите токове, се спазва условието

$$(5) \quad \tau_B \leq \frac{t_p}{3}.$$

Всеки листов материал, в зависимост от дебелината на листа δ , се характеризира с конкретна стойност на своята времеконстанта τ_B . Стойността ѝ зависи от специфичното електрическо съпротивление ρ на материала на магнитопровода и импулсната магнитна проницаемост

$$(6) \quad \tau_B = 4.10^{-8} \frac{\mu_{\Delta} \delta^2}{\rho}.$$

Нарастването на силиция в стоманата повишава магнитната проницаемост и специфичното електрическо съпротивление (намаляват загубите от вихрови токове) и намалява коерцитивният интензитет на стоманата (стеснява се хистерезисният цикъл – намаляват загубите от хистерезис). Но стомани със съдържание на силиций над 4,8 % се използват рядко тъй като те са твърди и крехки, което понижава тяхната технологичност. Освен това е известно, че нарастването на съдържанието на силиций в стоманата влошава нейната топлопроводимост, което означава по-висока температура във вътрешността на магнитопровода (при една и съща температура на повърхността му), а това пък означава



Фиг. 3.

че трансформаторът, при равни други условия, ще може да разсейва по-малка мощност.

Действителната стойност на импулсната магнитна проницаемост μ_{II} , с която се изчислява индуктивността на първичната намотка на ИТ, се определя от израза

$$(7) \quad \mu_{II} = A \mu_{\Delta},$$

където A е коефициент, чиято стойност се определя от отношението t_p / τ_B (фиг. 3). Ориентировъчно, при $t_p = 0,25 \div 1,0 \mu s$, дебелината на лентата трябва да бъде

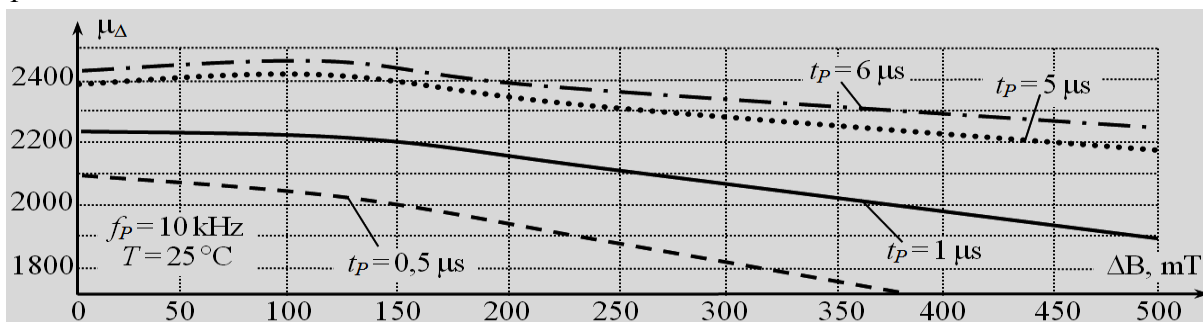
$\delta = 0,02 \div 0,08 \text{ mm}$, а за $t_p > 1,0 \mu s$, дебелината на лентата може да бъде по-голяма, в границите $\delta = 0,05 \div 0,1 \text{ mm}$.

В сравнение с листовите магнитно меки материали, феритите имат несравнимо по-голямо специфично електрическо съпротивление ($\rho = 0,1 \div 5 \Omega m$), поради което влиянието на вихровите токове при тях е пренебрежимо малко и $\mu_{II} \approx \mu_{\Delta}$. Освен това импулсната им магнитна проницаемост има от 5 до 10 пъти по-голяма стойност. При използване на феритни материали, импулсната магнитна проницаемост за всеки материал се отчита от експериментално получена зависимост $\mu_{II} = f(\Delta B)$ за определена продължителност на импулса t_p , и честота на повторение f (период $T = 1/f$).

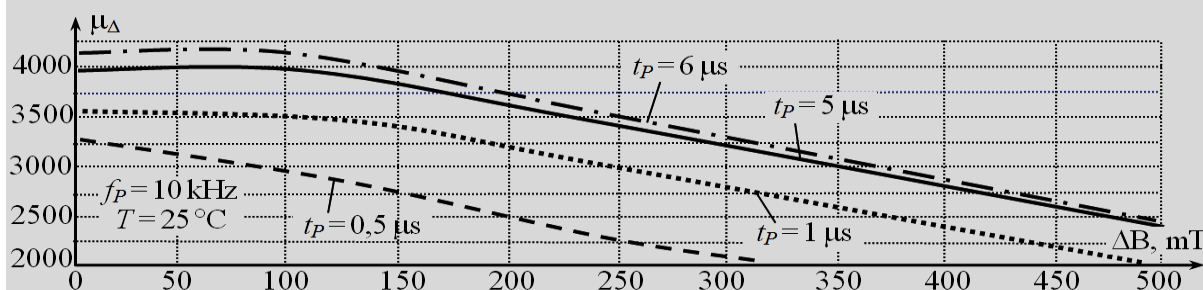
За феритите, използвани при изработването на мощни ИТ, освен стойността на импулсната магнитна проницаемост се взема под внимание и степента на загряване. Загубите и съответно загряването на намотките е незначително и загряването на ИТ се дължи преди всичко на загуби в магнитопровода. Затова важен параметър се явява коефициентът на специфичните обемни магнитни загуби p_{ϕ} . При избора на подходящ материал за мощни ИТ се използва зависимостта на p_{ϕ} от индукцията и от дължината на импулса. За изработването на магнитопровода се избира магнитномек материал, за който е налична експериментално снета зависимост на действителната импулсна магнитна проницаемост μ_{II} от изменението на индукцията ΔB при зададена продължителност на импулса t_p , честота на повторение на импулсите f_p и температура на околната среда T . Графиките на такива зависимости за произвежданите в Германия ферити T26, N30, T35, T38 и N27 са показани съответно на фигури: 4, 5, 6, 7, 8 и 9.

От феритните материали руско производство, подходящи за изработване на магнитопро-

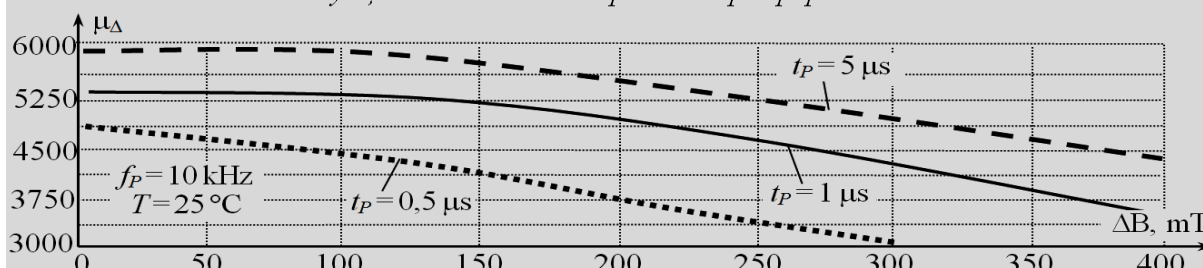
води за ИТ-ри са никел-цинковите ферити с марки: 300ННИ, 300ННИ1, 350ННИ, 450ННИ, 1000ННИ, 1100ННИ и манганово-цинковият ферит 1100НМИ. Данни за основните параметри на тези ферити са нанесени в *таблица 1*, а за допълнителните параметри – в *таблица 2*. Зависимостта на импулсната им магнитна проницаемост от температурата е показана на *фиг. 10*. За феритите 1000ННМ, 450ННМ и 1100НМИ зависимостта на специфичните обемни магнитни загуби от индукцията в магнитопровода при различна продължителност на импулса, е показана съответно на фигури: 11, 12 и 13. Зависимостта на импулсната магнитна проницаемост от продължителността на импулса, е показана на *фиг.14*.



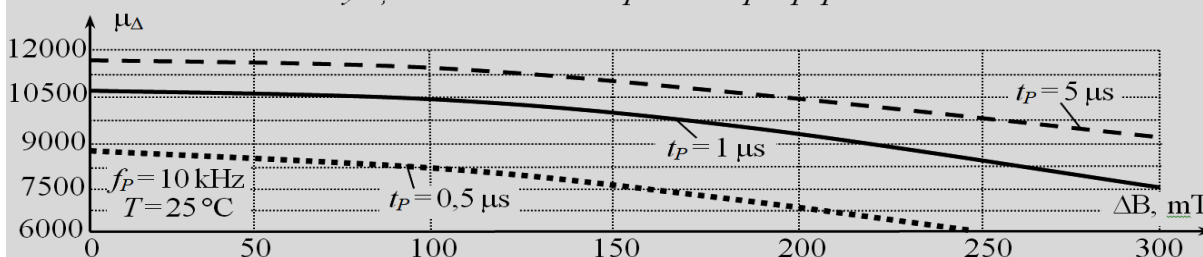
Фиг. 4. Зависимост на импулсната магнитна проницаемост μ_{Δ} от индукцията в магнитопровода при ферит T26



Фиг. 5. Зависимост на импулсната магнитна проницаемост μ_{Δ} от индукцията в магнитопровода при ферит N30



Фиг. 6. Зависимост на импулсната магнитна проницаемост μ_{Δ} от индукцията в магнитопровода при ферит T35

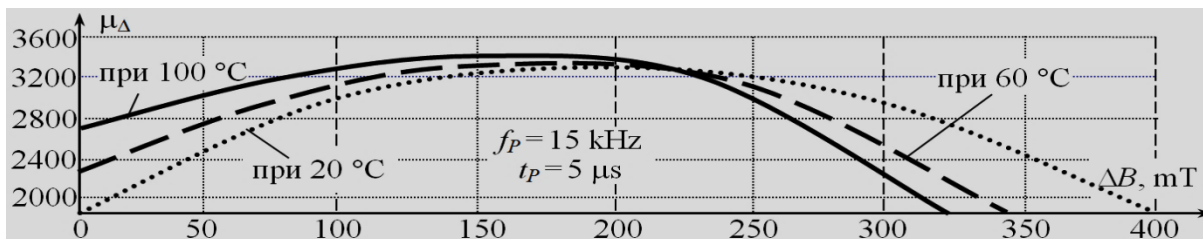


Фиг. 7. Зависимост на импулсната магнитна проницаемост μ_{Δ} от индукцията в магнитопровода при ферит T38

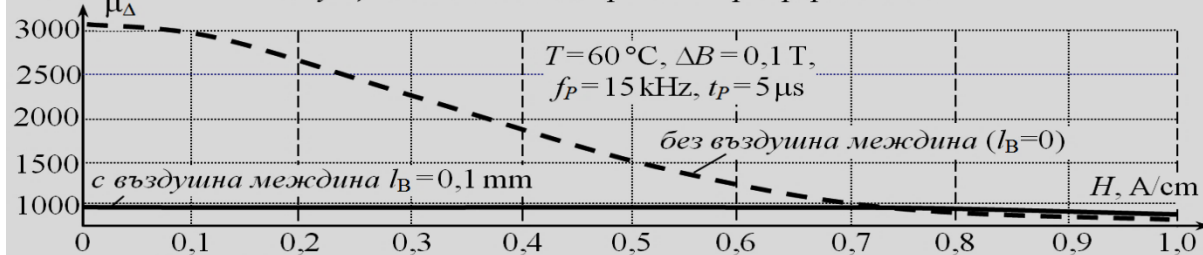
Изборът на стандартен магнитопровод става въз основа на изчисляване на най-малката допустима стойност за неговия обем. Минималният обем, който може да има магнитопровода се определя с помощта на израза

$$(8) \quad V = \frac{\mu_0 \mu_H U_{1m}^2 t_P^2}{\Delta B^2 L_1}, \quad m^3,$$

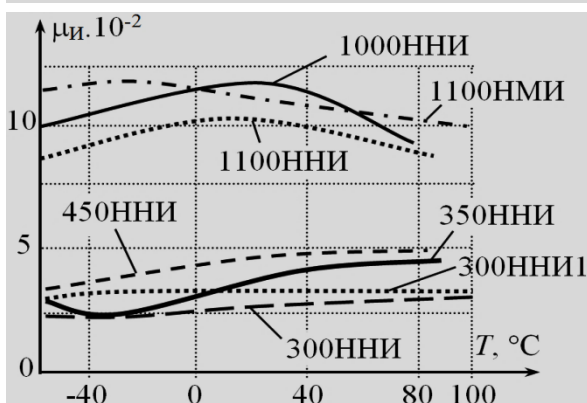
където $\Delta B = \Delta B_{max}$ и съответната стойност на μ_H се отчитат от таблицата или графиката, характеризираща конкретния феритен материал (например, за ферит N30 - фиг. 5).



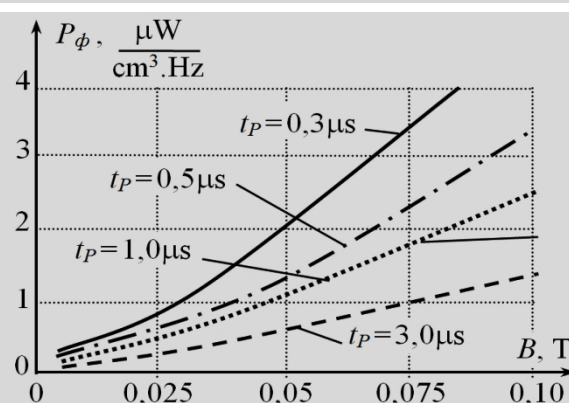
Фиг. 8. Зависимост на импулсната магнитна проницаемост μ_{Δ} от индукцията в магнитопровода при ферит N27



Фиг. 9. Зависимост на импулсната магнитна проницаемост μ_{Δ} от интензитета на полето при ферит N27



Фиг. 10. Температурна зависимост на импулсната магнитна проницаемост при оптимална напрегнатост на импулсното подмагнитващо поле, $t_P = 3 \mu s$ и $f_P = 5 kHz$



Фиг. 11. Зависимост на специфичните обемни магнитни загуби от индукцията в магнитопровод от ферит 1000ННИ, при различна дължина на импулса

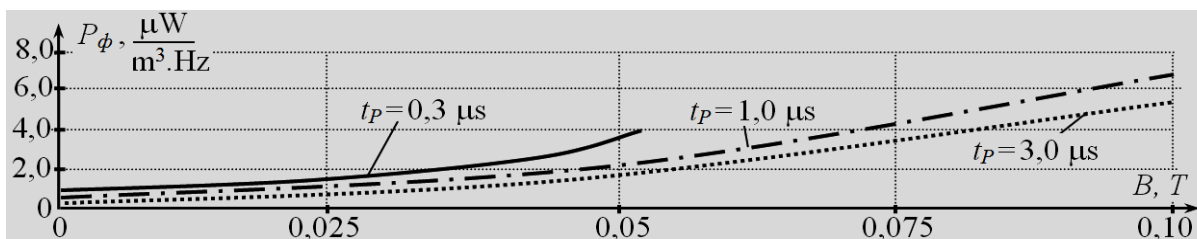
Таблица 1

Марка	μ_H при $t_P = 1 \div 3 \mu s$ и $f_P = 0.5 \div 5 kHz$	Оптимална стойност на H_H , A/m	Δ μ_H/μ_H , %, в температурен интервал	
			-60 ÷ +20 °C	+20 ÷ +80 °C
300ННИ	300 ± 50	80 ÷ 240	-30 ÷ +30	-30 ÷ +30
300ННИ1	300 ⁺⁸⁰ ₋₅₀	64	-4 ÷ +8	-4 ÷ +8
350ННИ	350 ± 75	80	-	-30 ÷ +30
450ННИ	450 ± 50	240	-25 ÷ 0	0 ÷ +10
1000ННИ	1000 ⁺³⁰⁰ ₋₂₅₀	64	-30 ÷ 0	-30 ÷ 0
1100ННИ	1100 ± 250	80	-50 ÷ 0	-50 ÷ 0
1100НМИ	1100 ± 150	80	-25 ÷ +25	-25 ÷ +25

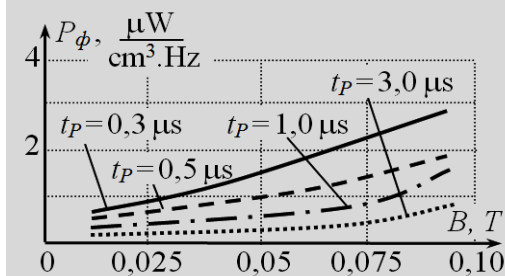
Въз основа на изчислената чрез израз (8) минимално необходима стойност за V , от таблици се избира стандартен магнитопровод. Ако не съществува магнитопровод с изчисления обем V , се избира магнитопроводът, чийто обем е по-голям и най-близък по стойност до изчисления.

Таблица 2

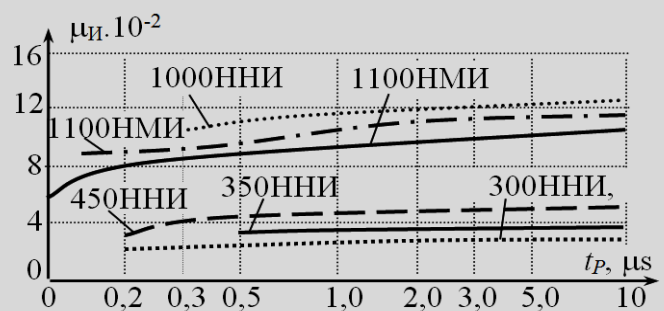
Марка	300ННИ	300ННИ1	350ННИ	450ННИ	1000ННИ	1100ННИ	1100НМИ
f_{KP} , MHz при $tg\delta_u=1$	2,0	2,0	2,5	1,0	0,5	0,4	0,3
μ_{max}	300	400	1000	2100	3000	3000	3000
H_0 , A/m при μ_{max}	240	160	80	56	32	32	32
B , T	0,30	0,22	0,26	0,37	0,30	0,27	0,40
B_r , T	0,28	0,06	0,12	0,16	0,09	0,08	0,15
H_C , A/m	160	96	48	40	16	20	24
$\Delta\mu_H/\mu_H$, %	-60÷+20 °C	-2,0÷+1,0	3,0÷24,0	8,0÷14,0	4,0÷9,0	3,0÷6,0	1,0÷3,0
при t° :	20÷100 °C	-2,0÷+1,0	4,0÷17,0	6,0÷18,0	2,0÷6,0	2,0÷4,0	1,0÷3,0
ρ , $\Omega\cdot m$	10	10^4	10^7	10^3	10^3	10	0,1
t° на Кюри над:	240 °C	160 °C	180 °C	230 °C	120 °C	110 °C	180 °C
Форма на магнитопровода	тороид, П-образна	тороид	тороид, О-образна	тороид, П-образна	тороид	тороид	тороид



Фиг. 12. Зависимост на специфичните обемни магнитни загуби от индукцията в магнитопровод от ферит 450ННИ, при различна дължина на импулса



Фиг. 13. Зависимост на специфичните обемни магнитни загуби от индукцията, в магнитопровод от ферит 1100НМИ, при различна дължина на импулса



Фиг. 14. Зависимост на импулсната магнитна проникваемост от дължината на импулса при напрегнатост на импулсното магнитно поле 80A/m и честота на импулсите $f_p=5kHz$

Таблица 3

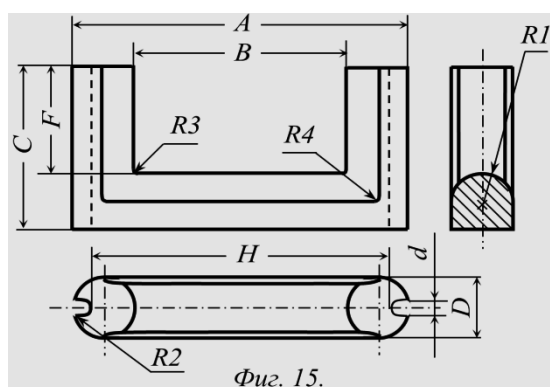
Означение	Размери, mm				Q , mm ²	V , mm ³
	D	d	h	l		
097.076.332	5	3	2	12,3	2,0	24,6
097.076.331	7	4	2	16,8	3,0	50,4
097.076.330-01	16	8	6	36,3	24,0	871
T10	20	10	5	45,3	25,0	1132
T19	31	19	6	77,1	36,0	2776

Таблица 4

Означение по DIN	Тип	Ферит	Размери, mm				Q , mm ²	V , mm ³	G , g
			D	d	h (y_2)	l			
C61020-A2-C11	R2.5	N30, T35, T39	2,5±0,12	1,5±0,1	1±0,1	6,1	0,5	3	0,02
C61020-A4-C7	R4	N30, T35, T39	4,0±0,15	2,4±0,15	1,6±0,1	9,7	1,27	12,3	0,07
C61020-A6-C4	R6.3	N30, T35, T39	6,3±0,20	3,8±0,15	2,5±0,12	15,3	3,1	47,5	0,3
C61020-A10-C8	R10	N30, T35, T39	10±0,25	6,0±0,15	4,0±0,15	24,5	8	196	0,9
C61020-A12-C1	R12.5	T26, N30	12,5±0,3	7,5±0,2	5±0,15	30,4	12	380	2
C61020-A16-C1	R16	T26, N30	16±0,4	9,6±0,3	6,3±0,2	38,7	20	770	3
C61020-A25-C1	R25	T26, N30	25±0,6	15±0,5	10±0,3	60,2	49	2950	13
C61020-A45-C1	R34	T26, N30	34±0,7	20,5±0,5	12,5±0,3	82	83	6780	31
C61020-A27-C1	R42	T26, N30	41,8±1	26,2±0,6	12,5±0,3	102,5	95	9750	45
C61020-A42-C1	R58	T26, N30	58,3±1	40,8±0,8	17,6±0,4	153	153	23400	110

Таблица 5

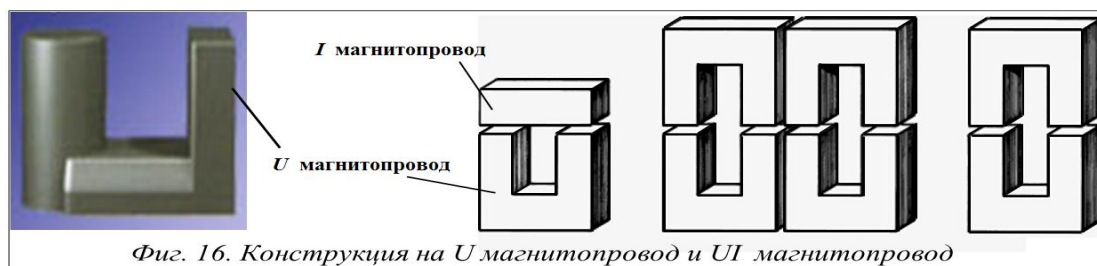
Форма на магнито-провод	П-образна (U-Kerne)	П-образна (U-Kerne)	П-образна (U-Kerne)	П-образна (U-Kerne)	П-образна (U-Kerne)+(I-Kerne)
Марка	U 52	U 59	U 57	U 64	
Означенение	B67332	B67333	B67334	B67335	B67336
Ферит	SIFERRIT N27	SIFERRIT N27	SIFERRIT N27	SIFERRIT N27	SIFERRIT N27
Размери, mm	A	52	59	57,5	64
	B	30,7 $\pm$ 1	26,5 $\pm$ 1	26,9	35,5
	C	23,9 $\pm$ 0,4	36,9 $\pm$ 0,4	28,4 $\pm$ 0,2	29,5 $\pm$ 0,2
	F	14,4 $\pm$ 0,7	21,5 $\pm$ 0,8	16	18
	H	46,1 $\pm$ 0,8	50,5 $\pm$ 1	49,8 $\pm$ 0,8	56,7 $\pm$ 1
	D	11,15 $\pm$ 0,2	17 $\pm$ 0,4	15,9 $\pm$ 0,4	13,8 $\pm$ 0,2
	d	3,25 $\pm$ 0,15	4,5	4,8	3,6
	R ₁	5,3	8,5	8	6,5
	R ₂	0,6	0,5	0,8	0,4
	R ₃	1	1	1	1
	R ₄	3	4	5	5
	I _{CT}	148	189	168	190
Q, mm ²	93	210	170	140	170
V, mm ³	13764	39690	28560	26600	28560
G, g	70	200	140	127	140



За избрания стандартен магнитопровод се отчитат конструктивните параметри. Сечението на магнитопровода Q, средната дължина на една силова линия в магнитопровода l и други конструктивни размери за български феритни тороидални сърцевини за ИТ, са нанесени в таблица 3. Параметрите и размерите на някои подходящи за ИТ феритни тороидални сърцевини немско производство, са нанесени в таблица 4. На фиг. 15 и фиг. 16 са показани феритни П-образни магнитопровод, немско производство. Този

тип магнитопровод, наречени U-Kern и I-Kern, са намерили широко приложение, поради високата технологичност, която осигуряват за ИТ. Данни за тези магнитопровод са дадени в таблица 5. Някои често използвани магнитопровод, техните макари и означенията им, съгласно стандартите DIN, са показани на фигури 17÷25а.

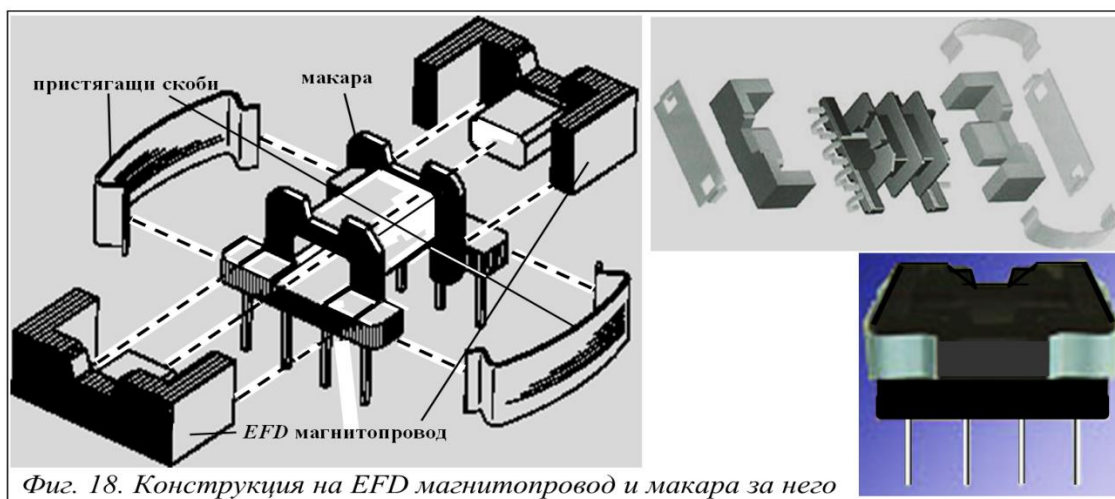
Съществува разнообразие и в произвежданите феритни магнитопровод за повърхностен монтаж (SMD). Такъв магнитопровод е показан на фиг. 25б.



Фиг. 16. Конструкция на U магнитопровод и UI магнитопровод



Фиг. 17. Конструкция на ETD магнитопровод и макара за него



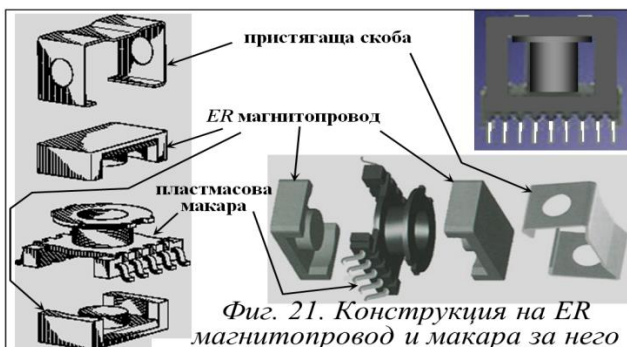
Фиг. 18. Конструкция на EFD магнитопровод и макара за него



Фиг. 19. Конструкция на R магнитопровод (тороид) от SIFERRIT T38, N30, N87, N35, T37, T97, T65, N67



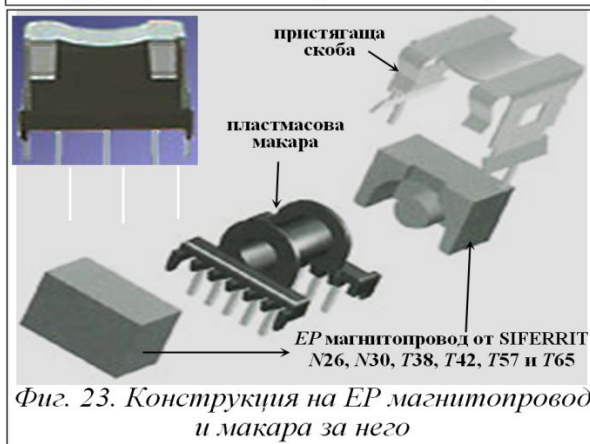
Фиг. 20. Конструкция на E магнитопровод и макара за него



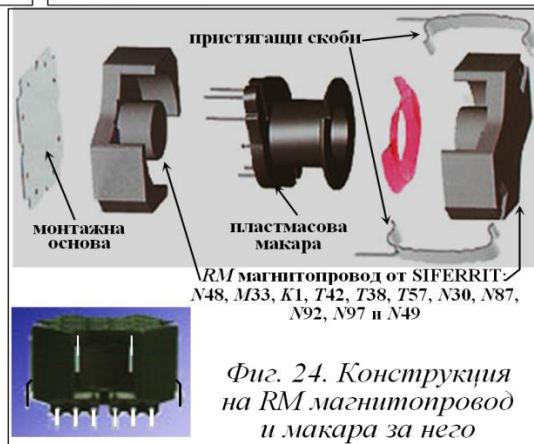
Фиг. 21. Конструкция на ER магнитопровод и макара за него



Фиг. 22. Конструкция на P магнитопровод и макара за него



Фиг. 23. Конструкция на EP магнитопровод и макара за него



Фиг. 24. Конструкция на RM магнитопровод и макара за него

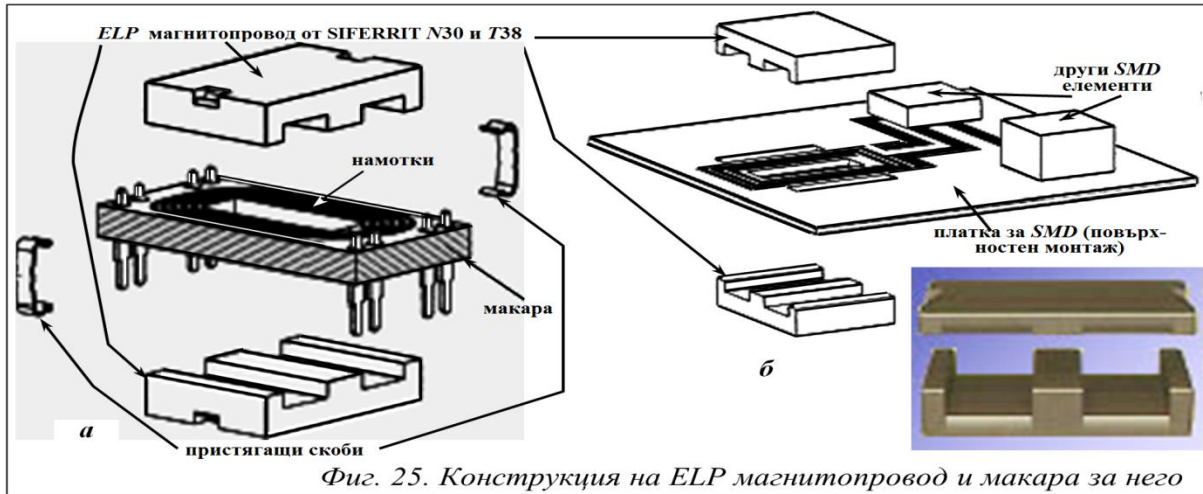
Както бе споменато в началото, проектирането на ИТ представлява математически неопределена задача, т.е. изходните данни са недостатъчни за определянето на всички параметри, което налага първоначално някои от тях да бъдат ориентировъчно избрани, след това, при необходимост, на един по-късен етап да бъдат коригирани техните стойности. Такова ориентировъчно пресмятане се прави по отношение на броя навивки в първичната намотка, като за целта се използва изразът:

$$(9) \quad W_{1OP} = \sqrt{\frac{L_1 \cdot I}{\mu_0 \mu_H Q}},$$

където μ_H е стойността на импулсната магнитна проницаемост, с която в израз (8) е изчислен необходимият минимален обем на магнитопровода.

Тъй като първоначално, не беше възможно точно да се изчисли работната индукция в магнитопровода, стойността на импулсната магнитна проницаемост μ_H бе ориентиrowъчно избрана. Това налага доуточняване на μ_H . Доуточняването се извършва по итерационната процедура на метода с последователните приближения. За целта, чрез формула (10) се изчислява работната индукция в магнитопровода ΔB :

$$(10) \quad \Delta B = \frac{U_{1m} \cdot t_P}{W_{1OP} \cdot Q}.$$



Фиг. 25. Конструкция на ELP магнитопровод и макара за него

Изчислената по този начин стойност на работната индукция в магнитопровода ΔB , се използва за отчитане на нова стойност на импулсната магнитна проницаемост, отбелязана по-долу като μ_H' . За отчитането на действителната стойност на импулсната магнитна проницаемост μ_H се използват същите графики, които са използвани за определянето на ориентиrowъчната стойност на импулсната проницаемост. Новата стойност на импулсната проницаемост се замества в израз (11) и се изчислява нов брой навивки за първичната намотка W'_{1OP} . От своя страна тази нова стойност служи за доуточняване на работната индукция в магнитопровода. След това се определя нова (трета по ред) стойност на импулсната проницаемост и т.н.

$$(11) \quad \begin{aligned} \Delta B = \frac{U_{1m} \cdot t_P}{W_{1OP} \cdot Q} &\rightarrow \mu_H' = f(\Delta B) \rightarrow W'_{1OP} = \sqrt{\frac{L_1 \cdot I}{\mu_0 \mu_H' Q}}, \\ \Delta B' = \frac{U_{1m} \cdot t_P}{W'_{1OP} \cdot Q} &\rightarrow \mu_H'' = f(\Delta B') \rightarrow W''_{1OP} = \sqrt{\frac{L_1 \cdot I}{\mu_0 \mu_H'' Q}}, \\ \Delta B'' = \frac{U_{1m} \cdot t_P}{W''_{1OP} \cdot Q} &\rightarrow \mu_H''' = f(\Delta B'') \rightarrow W'''_{1OP} = \sqrt{\frac{L_1 \cdot I_{CT}}{\mu_0 \mu_H''' Q}} \dots \end{aligned}$$

Препоръчва се процедурата (11) по доуточняване на навивките в първичната намотка да продължи до тогава, докато две последователни стойности на μ_H се различават с не повече от 3%. При правилно избрана първоначална стойност за μ_H , процесът е бързо сходим

и на практика, итерационната процедура съдържа не повече от 4 стъпки. След изчисляването на W_1 , чрез преводното отношение n , се определя броят на навивките във вторичната намотка

$$(12) \quad W_2 = n \cdot W_1.$$

Етапа на началните изчисления за ИТ завършва с определяне на диаметрите на проводниците в намотките. Емпиричният опит показва, че оптималната плътност на тока при тези трансформатори е в диапазона $6 \div 8 \text{ A/mm}^2$ ($\Delta = 6 \div 8 \text{ A/mm}^2$).

Ефективната стойност на тока I в намотките зависи от честотата на импулсите в импулсната поредица f , върховата стойност на тока I_m и времетраенето на импулса t_p

$$(13) \quad I = I_m \sqrt{f \cdot t_p}.$$

Като се знаят полезната импулсна мощност P_{H2} , коефициентът на полезно действие η и съотношението между тях

$$(14) \quad \eta = \frac{P_{H2}}{P_{H1}} = \frac{P_{H2}}{I_{1m} \cdot U_{1m}},$$

може да се изчисли импулсният ток в първичната намотка

$$(15) \quad I_{1m} = P_{H2} / \eta \cdot U_{1m}.$$

Но върховата стойност на тока в първичната намотка може да се изрази и като се използва индуктивността на първичната намотка L_1 :

$$(16) \quad \Delta B = \frac{U_{1m} \cdot t_p}{W_1 \cdot Q},$$

но $\Delta B = \mu_{\Delta} \cdot H_1$,

а $H_1 = I_{1m} \cdot W_1 / l$,

което означава, че

$$(17) \quad \Delta B = \mu_{\Delta} \frac{I_{1m} \cdot W_1}{l}.$$

Следователно

$$(18) \quad \frac{U_{1m} \cdot t_p}{W_1 \cdot Q} = \mu_{\Delta} \frac{I_{1m} \cdot W_1}{l},$$

а върховата стойност на тока е

$$(19) \quad I_{1m} = \frac{U_{1m} \cdot t_p}{\mu_{\Delta} \frac{W_1^2 \cdot Q}{l}}.$$

Но

$$(20) \quad \mu_{\Delta} \frac{W_1^2 \cdot Q}{l} = L_1,$$

което дава основание за върховата стойност на тока да се запише изразът

$$(21) \quad I_{1m} = \frac{U_{1m} \cdot t_p}{L_1}.$$

При изчисляване на ефективната стойност на тока I в първичната намотка (израз 13) се използва по-голямата от двете изчислени стойности за тока I_{1m} (по изрази (15) и (21)).

За определяне на диаметрите d_i на проводниците в първичната и във вторичната намотки

се използва изразът

$$(22) \quad d_i = 1,13 \sqrt{\frac{I_i}{\Delta}}.$$

Въз основа на резултатите, получени от изчисленията по израз (22), от таблица се избират стандартни проводници, притежаващи равен или по-голям от изчисления диаметър на медното сечение.

Контролните изчисления за ИТ се заключават в проверка на възможността, в намотъчното пространство на магнитопровода да се съберат всички намотки. При това, запълването на прозореца на магнитопровода трябва да бъде в оптимални граници. Ето защо, контролните изчисления включват контрол за събиране на намотките в прозореца на магнитопровода. И тук, както и при маломощните мрежови трансформатори и при нискочестотните трансформатори, коефициентът на запълване на прозореца с намотки K_3 е критерий за оптимално поместване на намотките. В конкретния случай този коефициент трябва да отговаря на ограничението $K_3 \leq 0,85$.

Контролът на коефициента на полезно действие и на температурата на загряване на ИТ е аналогичен на контрола, извършван при маломощните мрежови трансформатори. Но се отчитат само загубите от вихрови токове и от пренамагнитване, а загубите от хистерезис са достатъчно малки и се пренебрегват (частните хистерезисни цикли са с многократно по-малка площ от площта на пълния хистерезис). Задължително, след като завърши проектирането на ИТ се изработва опитен образец и експериментално се измерват всички негови параметри. При необходимост се извършват експериментални проверки на параметрите на импулса: време на нарастване на импулса, времетраене (продължителност) на импулса, време за затихване на импулса, време на възстановяване, спад на платото и допустим отскок на импулса. Ако параметрите на ИТ са в допустимите граници се пристъпва към серийно производство, в противен случай се правят необходимите корекции.

Експериментални резултати

За целите на експерименталната проверка на надеждността, по двадесет броя опитни образци на три различни импулсни трансформатори (с три различни стойности на изходното напрежение), проектирани и изработени по описаната методика, бяха подложени на бърнинговане.

Проектираните и изработени импулсни трансформатори бяха следните изходни данни: съпротивления на товара: $R_2 = 206 \Omega$, $R_3 = 18 \Omega$, $R_4 = 2,3 \Omega$ (за първия вид ИТ), $R_2 = 188 \Omega$, $R_3 = 22 \Omega$, $R_4 = 2,0 \Omega$ (за втория вид ИТ), $R_2 = 206 \Omega$, $R_3 = 20 \Omega$, $R_4 = 2,3 \Omega$ (за третия вид ИТ); вътрешно съпротивление на генератора на импулси $R_i = 40 \Omega$; върхова стойност на напрежението на входните импулси $U_{1m} = 300 \text{ V}$; върхова стойност на тока в първата вторична намотка (токът, протичащ през товара R_2) $I_{2m} = 0,55 \text{ A}$; върхова стойност на тока във втората вторична намотка (токът, протичащ през товара R_3) $I_{3m} = 0,85 \text{ A}$; върхова стойност на тока в третата вторична намотка (токът, протичащ през товара R_4) $I_{4m} = 2,2 \text{ A}$; честота на импулсната поредица $f_p = 15 \text{ kHz}$ (за първия вид ИТ), $f_p = 18 \text{ kHz}$ (за втория вид ИТ), $f_p = 20 \text{ kHz}$ (за третия вид ИТ); продължителност на импулса $t_p = 4,5 \mu\text{s}$; относителен пад на напрежението върху товара R_2 в края на импулса, ненадвишаващ $2,8\%$ ($p \leq 2,8\%$). ИТ са проектирани да работят при нормални климатични условия, в затворено помещение, при продължителен режим на работа. Оразмерени са така, че да отговарят на изискването за минимално тегло и обем (размери).

Проведеното изпитване бе с продължителност 4000 часа, през които циклично бяха променяни температурата (от 20°C до 85°C), влажността (от 40% до 85%) и налягането на въздуха в термобарокамерата, в която ИТ бяха изпитвани. Натоварването също циклично

бе променяно и варираше от 90% до 105% от номиналната стойност. По време на изпитването не бе констатиран нито един внезапен отказ на трансформатор. Параметрични откази също не са констатирани нито по време на изпитването, нито през следващата една година на реална експлоатация, в която работата на трансформаторите бе наблюдавана. И въпреки, че при липса на откази класическата надеждност [4], [5] не дава точна представа за интервалните и точковите статистически оценки на важните за надеждността количествени показатели на изпитваните изделия, с основание може да се приеме, че интензивността на отказите е пренебрежимо малка [6], [7], а стойността на вероятността за безотказна работа на проектираните и изпитвани ИТ, оценена за период от време от една година, има стойност достатъчно близка до единица. Съответно, коефициентът им на готовност също клони към единица.

Литература

- [1] Антон Сл. Георгиев. Ръководство за семинарни упражнения и курсова работа по конструиране и технология в електрониката. Аквапринт, Варна, 2009.
- [2] Антон Сл. Георгиев. Конструкция и технология на електронна апаратура. ТУ-Варна, 2002.
- [3] Антон Сл. Георгиев, Румен Б. Пранчов. Конструиране и технология на електронна апаратура. ТУ-Варна, 2003.
- [4] Беляев Ю. Надежность технических систем. Справочник под ред. И. Ушаков. М., Радио и связь, 1985.
- [5] Антон Сл. Георгиев. Надеждност на електронните изделия, Аквапринт, Варна, 2019.
- [6] Toncho Papanchev, Julia Garipova. An Extended Analysis of Reliability Test Data. XXIX International Scientific Conference Electronics (ET2020). Sozopol, Bulgaria, 2020.
- [7] P. Prodanov and D. Dankov, "Reliability Of Power Supplies For Induction Heating Through An Analysis Of The States In Operating Modes", 19th International Symposium Power Electronics Ee2017, pp. 1-6, 2017.