

Минно-Геоложки Университет

“Св. Иван Рилски” – гр. София

Минно електро-механичен факултет

КАТЕДРА “ЕЛЕКТРИФИКАЦИЯ НА МИННОТО ПРОИЗВОДСТВО”

инж. Тодор Ангелов Върбев

**РАЗРАБОТВАНЕ И ИЗСЛЕДВАНЕ НА ЗАХРАНВАЩО
УСТРОЙСТВО ЗА НИСКО НАПРЕЖЕНИЕ С
МАГНИТЕН ШУНТ**

АВТОРЕФЕРАТ

За получаване на образователна и научна степен “Доктор”

По професионално направление:

5.2. Електротехника, електроника и автоматика,
научна специалност “Електроснабдяване и
електрообзавеждане (по отрасли)”

НАУЧЕН РЪКОВОДИТЕЛ:

ПРОФ. ДТН АНДРЕЙ СТЕФАНОВ КОЗАРОВ

София, 2014

Дисертационния труд е обсъден от разширен състав на катедрения съвет на катедра “Електрификация на минното производство” на 18.12.2014г. и е насочен за защита към Научно жури.

Рецензенти:

.....

.....

Защитата на дисертационния труд ще се състои на. 19.03.2015г. от 14 часа в зала 204 б на МИННО – ГЕОЛОЖКИ УНИВЕРСИТЕТ “Св. Иван Рилски” за присъждане на образователна и научна степен “Доктор” пред Научно жури.

Материалите по защитата са на разположение на интересувашите се в канцеларията на сектор “Следдипломна квалификация” на МГУ “Св. Иван Рилски”

Адрес: 1700 София, Студентски град
ул. „Проф. Боян Каменов”
МГУ „Св. Иван Рилски”

ОБЩА ХАРАКТЕРИСТИКА НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

1. Актуалност на проблема.

Разширяването на приложението на безконтактното управление и защита е проблем с особено важно значение за минното електроснабдяване и електрообзавеждане, свързан с безопасността и взривозащитата на електрическите апарати.

Една от посоките за решаване на този проблем е приложението на безконтактни електромагнитни апарати. Недостатъците им, свързани преди всичко с голямата им маса и габарити и със значителните загуби в тях, успешно се преодоляват чрез функционалното им интегриране. Типичен пример представляват захранващите устройства с ограничена мощност, напрежение до 1000 V, които задължително трябва да притежават трансформатор редуциращ напрежението. Прилагайки така наречения магнитен шунт, може сравнително лесно да се решат някои съществени проблеми и да се повишат качествата на захранващото устройство, което да придобие възможност за регулиране и стабилизиране на напрежението, за защита от ненормални режими на тока, при което той се редуцира до минимална стойност, без да се прекъсва.

Разработването на нови идеи за приложение на магнитния шунт е принос за решаването на проблема с масово въвеждане на безконтактното управление и защита, като предпоставка за повишаване на надеждността на електрическите апарати и най – вече облекчава съществено задачата за тяхната взривозащита.

1. Цели и задачи на работата

Целта на работата е да се разкрият допълнителни възможности на електромагнитните апарати с магнитен шунт и да се обоснове приложимостта им като основен елемент в захранващите устройства с ограничена мощност $10^2 \div 10^3$ VA. За изпълнението на тази цел са предложени оригинални идеи за приложимост на магнитните шунтове със следните задачи:

- за възможността за регулиране на тока и напрежението в процеса на включване и изключване на потребител;
- разработване на безконтактна токова защита;
- изследване на захранващо устройство с автоматично стабилизиране на напрежението;
- подобряване на ефективността на магнитния шунт;

2. Методи на изследване.

В дисертацията са съчетани теоретични и експериментални методи на изследване. Теоретичните анализи са целенасочени за получаване на основните зависимости на електрическите величини като функция на състоянието и

действията на магнитния шунт. Базирани са на еквивалентни схеми, в които са отразени обосновани ограничения в условията.

Точността и коректността на теоретичните изследвания са потвърдени с експериментални методи приложени на разработени и изработени образци, с използване на конвенционална и специализирана измервателна техника с висок клас на точност.

3. Научна новост.

Предложените нови три оригинални приложения на магнитния шунт представляват научната новост в дисертацията. Теоретичните и експериментални изследвания защитават убедително тяхната приложимост.

4. Приложимост и полезност.

Предложените и реализираните с опитните образци идеи, може да бъдат приложени в еднофазни захранващи устройства за ниско напрежение.

Полезността им се изразява в безконтактното регулиране и/или стабилизиране на напрежението им, в безконтактната максималнотокова защита подходяща за вграждане във взривозащитени апарати.

5. Апробации.

Основни части от дисертационния труд са апробирани пред научни сесии с международно участие в МГУ „Св. Иван Рилски” в периода 2004÷2012, а докладите са отпечатани в годишниците на МГУ „Св. Иван Рилски”, св. III, Механизация, електрификация и автоматизация в мините.

6. Публикации.

По дисертационния труд има общо четири публикации. Три от тях са в съавторство с научния ръководител и една е самостоятелна.

7. Обем и структура на дисертацията.

Дисертационният труд е структуриран в увод, пет глави, заключение, претенции за приноси, публикации на автора по дисертационния труд, използвана литература и приложение. Общият обем на дисертацията, без приложението е 120 страници.

ГЛАВА I - АПАРАТИ С МАГНИТНИ ШУНТОВЕ. ПОСТИЖЕНИЯ И ИДЕИ.

I.1. Общи сведения за магнитния шунт и неговото приложение

Магнитния шунт е част от магнитна верига с който може да се променя магнитния поток в нея, с цел регулиране на изходните параметри на дадено устройство.

Плавно регулиране на напрежението във вторичната намотка на трансформатор може да се постигне с изменение на коефициента на магнитната връзка между първичната и вторичната намотка на трансформатора. Един от начините за постигане на такова регулиране е използването на магнитен шунт. Изменението на магнитното съпротивление на шунта може да се постигне чрез: изменение на въздушната междина между шунта и магнитната верига или чрез подмагнитване на шунта чрез постоянен или променлив ток.

Магнитните шунтове намират широко приложение: за регулиране и стабилизиране на тока при електродъговите заваръчни апарати; в измервателната техника; в електрозадвижването; при измервателните и силови трансформатори; в трансформаторите за хранване на газоразрядни /неоновии/ лампи; в автоматиката; за регулиране на напрежението на хранващи трансформатори; при конструиране на стабилизатори на напрежение

Ако трябва да се обобщи използването на магнитните шунтове може да се отбележи, че основно се прилагат за регулиране на тока и стабилизиране на напрежението.

I.2. Източници на ток и напрежение с магнитни шунтове

В източниците на ток с възможност за неговото регулиране и стабилизиране преимуществено се прилагат магнитни шунтове. Характерен пример са трансформаторите за електродъгово заваряване.

На еднофазни трансформатори с магнитен шунт с кондензатори в първичната страна са посветени изследвания през 90 - те години.

Регулирането на напрежението на трансформаторите може да бъде статично или динамично. Статичното регулиране на напрежението, чрез изводи на първичните или вторичните намотки, не винаги е достатъчно ефикасно, въпреки, че масово се прилага.

В зависимост от мястото на включване на хранващото устройство към електрическата мрежа, то се присъединява към нея с плюсови или минусови клеми, изведени на първичната намотка на трансформатора.

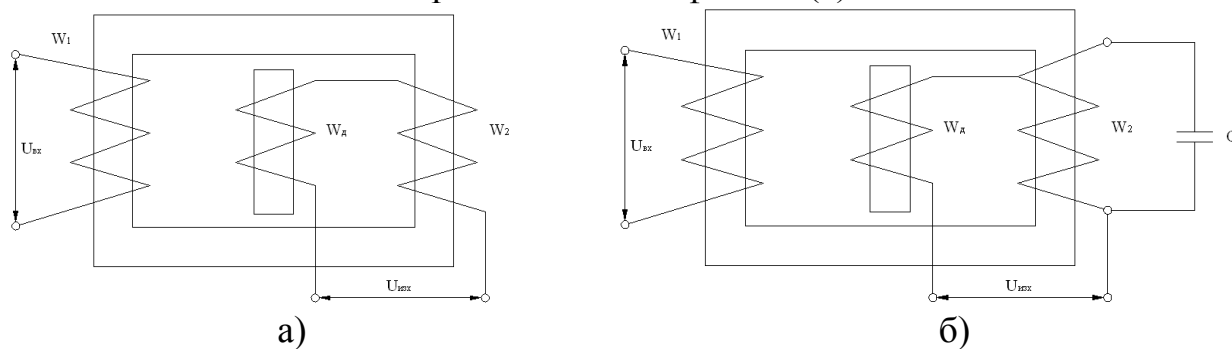
Друг начин за повишаването на напрежението на електрическите консуматори е използването на волтодобавъчен трансформатор, а съществуват и решения чрез включване на допълнителен източник на мощност.

За да може да бъде компенсирани отклоненията на напрежението във времето е необходимо да бъдат използвани електромагнитни стабилизатори. Най-често се използват стабилизаторите на напрежение, при които входната величина е напрежението на хранващия източник, а изходната е напрежението подавано на електрическия консуматор. В зависимост от метода,

който се използва за стабилизиране на изходната величина, стабилизаторите биват параметрични и компенсационни.

И при двата типа електромагнитни стабилизатори, обикновено, основен елемент е специален трансформатор с магнитен шунт. Чрез магнитния шунт се цели отклонение на част от основния магнитен поток, което довежда до промяна в изходното напрежение на стабилизатора. Отклонението на част от основния магнитен поток през магнитния шунт, се осъществява чрез промяна на неговата проводимост. Промяната на магнитната проводимост на магнитния шунт се осъществява с намаляване и увеличаване на въздушната междина δ и по този начин се регулира напрежението U_2 .

За стабилизиране на напрежението на електрическите консуматори се използват и параметрични стабилизатори, използващи дросели с наситена и ненаситена сърцевина (с въздушна междина на магнитопровода). Възможно вместо два дросела да се използва трансформатор с магнитен шунт. Принципна схема на такъв стабилизатор е показана на фиг. 1.5(а).



Фиг. 1.5

Ролята на дросел с насищане изпълнява частта от магнитопровода, обхванат от намотката w_2 , а ролята на ненаситен дросел се изпълнява от магнитния шунт, а добавъчното напрежение за подобряване на работата на стабилизатора ще се получава от намотката w_g , намотана върху шунта.

Ферорезонансен стабилизатор може да бъде реализиран и с трансформатор с магнитен шунт, по схемата показана на фиг. 1.5(б).

Към трансформаторите с магнитен шунт можем да отнесем и изследванията насочени към специфичните проблеми на осветителната техника.

Разработени са серия от трансформатори за рекламни осветителни тела, за флуоресцентно осветление с напречен и надлъжен магнитен шунт. Изследвана е теоретично работата на трансформатори с магнитни шунтове, използвани за осветление с газоразрядни лампи.

Проучването ни показва, че в мините не са използвани електромагнитни апарати с магнитни шунтове за безконтактно регулиране на напрежението на ръчни електрически инструменти, за осветление и за по мощни /оперативни/ вериги с променливи напрежения, 220, 127, 42, 36, 24 V и 12 V.

I.3. Захранващи устройства с малка мощност и ниско напрежение използвани в мините

Съгласно действащите правилници за безопасност на труда в подземните рудници, за геологопроучвателните обекти и в откритите рудници, използването на променливо напрежение 127 V и повече /до 1200 V/ изисква задължително изолирани спрямо земя мрежи /IT/ с непрекъснат контрол на съпротивлението на изолацията и защитно изключване с релета от токови утечки.

В геологопроучвателните обекти са регламентирани и заземените /TN/ мрежи, ако има защита от утечки с дефектно - токови релета предпазващи от директен и индиректен допир.

За напрежение под 127 V AC не се изисква контрол на изолацията и защитно изключване.

Тази регламентация определя и структурата на произвежданите захранващи устройства ниско напрежение /НН/ за мините. Те съдържат понижаващ трансформатор с първично напрежение на мрежата /380, 660, 1000, 1140/V AC и вторично напрежение 220 V AC или/и 127 V AC; релета от токови утечки и защита на изходите с токови защиты от предпазители или максималнотокови електромеханични релета. В захранващите устройства са вградени блокове за дистанционно включване на консуматорите, например пробивна техника.

Номиналната им мощност достига 5 kVA. Комутационните и защитни апарати са електромеханични .

Това обстоятелство, заедно с тежките експлоатационни условия и опасността от експлозия на метановъздушна смес при разработване на въглищни рудници, налагат специална конструкция на обвивката, в нормално руднично изпълнение /РН/ приложима в рудници без опасности от експлозия на газ и прах и взривозащитено изпълнение E_x , най често взривнепроницаемо E_xd , и често с искробезопасна верига E_xseI .

I.4. Токови защиты в захранващите устройства за НН

Токовите защиты в захранващите устройства НН се използват срещу къси съединения и претоварване. Спектърът на прилаганите защиты в захранващите устройства използвани в мините е много широк и в известен смисъл тривиален: от предпазители и термобиметални релета с добре известни предимства и превишаващи недостатъци; максималнотокови електромеханични изключватели /релета/ с независима и зависима характеристика; електронни защиты, най-често транзисторни или с управляеми диоди, и се достигне до точните и с практически неограничени възможности цифрови защиты, синтезирани от полупроводникови елементи с висока степен на интеграция, включително микропроцесори и с големи възможности по отношение на защитни характеристики и бързодействие.

Трябва да се подчертае, че във всички изброени защиты, крайният елемент, който осъществява изключването на устройството е електромеханичен. Много рядко в захранващите устройства, обект на анализа

се осъществява безконтактното им изключване при претоварване или къси съединения.

В литературата няма данни за използване на токови защиты в захранващите устройства с мощност до 5 kVA, прилагани в мините и в други отрасли, с нетрадиционни подходи, включително с магнитен шунт.

Обзорът на основните приложения на електромагнитните устройства с магнитен шунт и на използваните захранващи устройства с ограничена мощност и ниско напрежение в мините и други отрасли, позволяват да се обобщат следните изводи.

Изводи

1. Електромагнитните устройства с магнитен шунт са намерили относително най-голямо приложение в източниците на ток за заваръчни агрегати, в стабилизаторите на напрежение и в по-малка степен за стъпално регулиране на мрежовото напрежение, в специални трансформатори за газоразрядни осветители, в измервателната техника и др.

2. Няма данни за приложението на магнитен шунт за безконтактно регулиране на напрежението в процеса на пускане /включване/ на товара и за осъществяване на безконтактна защита от къси съединения и претоварване.

3. В захранващите устройства с мощност /до 5 kVA/ и ниско напрежение прилагани в мините за управление на ръчна пробивна техника и осветление не е предвидено безконтактно регулиране на напрежението, а използваните максималнотокови защиты предизвикват изключване при къси съединения и претоварване най-често с електромеханично въздействие върху входния /захранващия/ прекъсвач или върху комутационните апарати на изходите на товара.

От направените изводи следват и

Цел и задачи на дисертацията.

Целта на разработената дисертация е да осигури предпоставки за създаване на захранващи устройства с малка мощност и ниско напрежение приложими за управление на пробивна техника с ограничена мощност и за осветление.

За изпълнение на тази цел са необходими нетрадиционни решения, осъществими при решаването на следните задачи:

- Теоретично изследване съчетано с експериментални изследвания за доказване на техническата възможност за реализация чрез магнитен шунт на безконтактно и плавно включване на пробивна техника и за поддържане на оптимално напрежение;

- Теоретично и експериментално доказателство на възможността за създаване на безконтактна защита от къси съединения и претоварване с магнитен шунт.

ГЛАВА II - УСТРОЙСТВО С МАГНИТЕН ШУНТ ЗА ПЛАВНО БЕЗКОНТАКТНО УПРАВЛЕНИЕ НА ЕЛЕКТРИЧЕСКИ ТОВАР. ПОСТИЖЕНИЯ И ИДЕИ.

Предлага се ново функционално приложение на на апаратите с магнитен шунт в еднофазно изпълнение – безконтактно плавно пускане и увеличаване на електрически товар.

На базата на предложено принципно устройство е извършен теоретичен анализ на заместващата схема и са доказани основни зависимости, доказващи работоспособността и приложимостта на идеята.

Експериментални изследвания в лабораторни условия на опитен образец потвърждават очакваните качества на устройството.

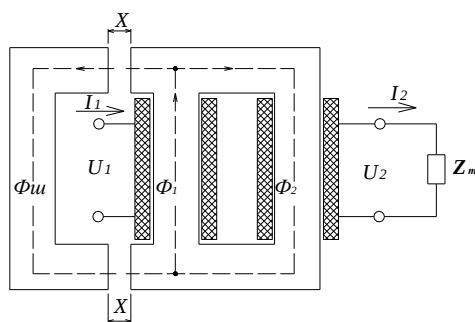
II.1. Принципна схема на захранващото устройство

Принципната схема на предлаганото захранващо устройство е показана на фиг. 2.1.

Устройството се състои от понижаващ трансформатор, чрез който се захранват монофазни електрически консуматори, като се редуцира захранващото напрежение на входа U_1 до напрежението на изхода U_2 приложено към товара Z_m .

Конструкцията на трансформатора, реализирана и в опитния образец, предполага разделно разположение на двете намотки.

Първичната и вторична намотки на трансформатора са поставени на различни ядра.



Фиг. 2.1. Принципна схема на захранващото устройство

За постигане на плавно и безкомутационно включване и изключване на електрическия товар, към ядрото с навита първична намотка е поставен магнитен шунт. Чрез него се отклонява част от основния магнитен поток Φ_1 . По този начин се получава плавно и безконтактно включване и изключване на електрическия товар.

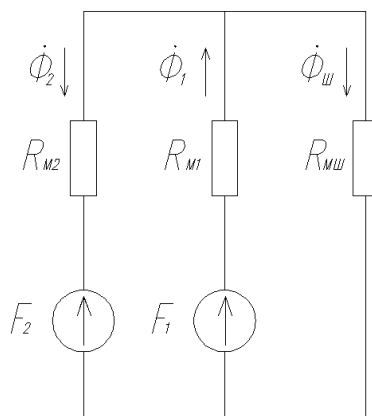
II.2. Теоретични анализи на основни параметри

За да се изследва работата на магнитния шунт като безконтактен ключ е необходимо да се намери зависимостта на вторичното напрежение U_2 във функция от разстоянието x между шунта и основния магнитопровод.

За провеждане на анализ с първо приближение се правят следните предположения: пренебрегват се магнитните потоци на разсейване през

въздуха, с изключение на потока през шунта; приема се, че напречното сечение на всички потоци е едно и също, включително и на потока през въздушните междини с дължина x и е равно на сечението S на магнитопровода; магнитната проницаемост на стоманата $\mu_{ст}$ се приема за постоянна; пренебрегват се активните съпротивления на намотките и загубата в стоманата.

На следващата фиг.2.2.е показана заместващата схема на захранващото устройство.



Фиг. 2.2. Заместваща схема

По тази схема прилагайки първия закон на Кирхоф може да се запише уравнението,

$$\dot{\Phi}_1 = \dot{\Phi}_2 + \dot{\Phi}_{ш} \quad (2.1)$$

а по втория закон на Кирхоф, като се използва метода на контурните токове се съставят уравненията:

$$R_{M1} \dot{\Phi}_1 + R_{Mш} \dot{\Phi}_{ш} = \dot{F}_1 \quad (2.2)$$

$$\dot{F}_1 - \dot{F}_2 = R_{M1} \dot{\Phi}_1 + R_{M2} \dot{\Phi}_2 \quad (2.3)$$

Магнитодвижещите напрежения $\dot{F}_1$ и $\dot{F}_2$ могат да се заметят с формулите $\dot{F}_1 = w_1 \dot{I}_1$ и $\dot{F}_2 = w_2 \dot{I}_2$. Решавайки получената система от уравнения се получава уравнението:

$$\dot{U}_2 = \frac{w_2}{w_1} \dot{U}_1 \frac{R_{Mш}}{R_{M2} + R_{Mш} + \frac{w_2^2 \omega}{z_2}} \quad (2.14)$$

Полученото уравнение (2.14) дава зависимостта между вторичното напрежение U_2 , косвено от разстоянието x между шунта и магнитопровода чрез $R_{Mш}$ и товара z_2 .

Изразявайки магнитните съпротивления с геометричните размери на магнитните вериги и магнитната проницаемост на материала и замествайки ги в (2.14), то получава вида:

$$\dot{U}_2 = \frac{w_2}{w_1} \dot{U}_1 \frac{l_{ш} + 2x \frac{\mu_{ст}}{\mu_0}}{l_2 + l_{ш} + 2x \frac{\mu_{ст}}{\mu_0} + \frac{\mu_{ст} S^2 w_2^2 \omega}{z_2}} \quad (2.15)$$

Последното уравнение дава зависимостта между вторичното напрежение U_2 , разстоянието x , товара z_2 и геометричните размери на магнитния шунт и захранващия трансформатор.

II.3. Теоретично изследване зависимостта на вторичното напрежение от разстоянието x , между шунта и магнитопровода.

От получената зависимост (2.15) се потвърждава, че съществува принципна възможност да се намали напрежението на товара значително, при допиране на шунта до бедрото на трансформатора, с първичната намотка на трансформатора.

За разработения образец с посочените технически параметри, използвайки формула (2.15), може да се построи теоретичната крива показваща изменение на вторичното напрежение U_2 , във функция от разстоянието x , и товара z_2 , $U_2 = f(x)$. Изчисленията по (2.15) за изработения образец при вторичен товар изменящ се в границите от $R_T = \infty$ до $R_T = 0,1 \Omega$, включващ и номинален $R_T = R_H = 5,3 \Omega$ за различни стойности на $x \in [0-16] \text{ mm}$; са дадени на таблици 2.1 до 2.6.

Табл. 2.1

$R_T = \infty$ (празен ход)											
x, mm	16	6	5	2,4	2	1,4	1	0,5	0,2	0,1	0
U_2, V	45,95	45,75	45,69	45,3	45,16	44,8	44,33	42,83	39,4	37,19	23,03

Табл. 2.2

$R_T = R_H = 5,3 \Omega$											
x, mm	16	6	5	2,4	2	1,4	1	0,5	0,2	0,1	0
U_2, V	44,62	42,43	41,77	38,01	36,75	33,84	30,77	23,55	14,63	9,86	3,36

Табл. 2.3

$R_T = 2,00 \Omega$											
x, mm	16	6	5	2,4	2	1,4	1	0,5	0,2	0,1	0
U_2, V	42,78	38,26	37,02	30,62	28,73	24,73	21,1	14,05	7,53	4,72	1,47

Табл. 2.4

$R_T = 0,75 \Omega$											
x, mm	16	6	5	2,4	2	1,4	1	0,5	0,2	0,1	0
U_2, V	37,99	29,45	27,49	19,23	17,26	13,69	10,78	6,31	3,04	1,83	0,54

Табл. 2.5

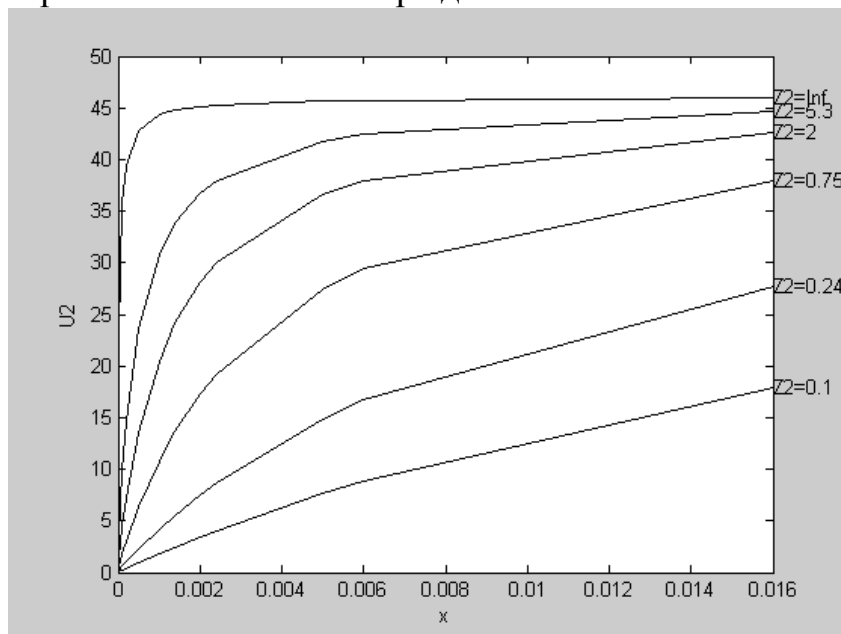
$R_T = 0,24 \Omega$											
x, mm	16	6	5	2,4	2	1,4	1	0,5	0,2	0,1	0
U_2, V	27,78	16,76	14,88	8,65	7,46	5,53	4,13	2,24	1,03	0,60	0,18

Табл. 2.6

$R_T = 0,1 \Omega$											
x, mm	16	6	5	2,4	2	1,4	1	0,5	0,2	0,1	0
U_2, V	17,88	8,88	7,66	4,05	3,44	2,48	1,82	0,96	0,43	0,25	0,17

По данните от тези таблици са построени графики, показани на фиг. 2.4.

Изчислените стойности на вторичното напрежение U_2 показват, че изработения образец потвърждава идеята за ограничаване на изходящото напрежение при намаляване на товара до малки – безопасни стойности.

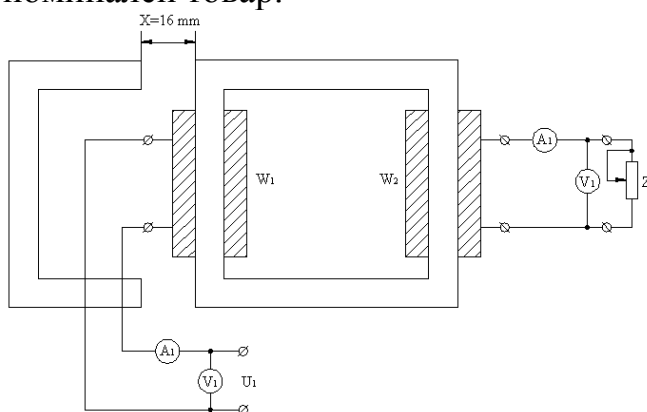


Фиг. 2.4.Изменение на вторичното напрежение U_2 в зависимост от разстоянието x , при различен товар z_2

II.4. Експериментални изследвания

На разработеният образец са направени лабораторни измервания, за определяне на изменението на вторичното напрежение U_2 в зависимост от разстоянието x , при празен ход и при номинален товар $z_2 = z_H = 5,3 \Omega$. Схемата на опитната постановка е показана на фигура.2.5. Измерват се тока и напрежението на първичната намотка w_1 и на вторичната намотка w_2 , като товара се имитира с реостатно включен резистор, означен с z_2 .

Първичното напрежение $U_1 = 400 V \pm 1 \%$, максималната входна мощност е $475 \pm 0,5 \% VA$ при номинален товар.



Фиг.2.5

Измерванията са направени при различни разстояние на шунта $x=16; 6; 2,4; 1; 0,2$ и $0,1$ mm. Получените резултати са дадени в таблици 2,7 и 2,8.

Измервания при $z_2 = \infty$ /празен ход/

Табл. 2.7

x, mm	16	6	2,4	1	0,2	0,1
U_1 , V	396	396	396	396	396	396
$I_1=I_0$, A	0,46	0,44	0,4	0,38	0,31	0,25
U_2 , V	47	46	45	44,5	42,5	40

Измервания при $z_2 = z_H = 5,3\Omega$

Табл. 2.8

x, mm	16	6	2,4	1	0,2	0,1
U_1 , V	396	396	396	396	396	396
I_1 , A	1,195	1,18	1,12	1	0,8	0,58
U_2 , V	43,5	42,5	40	31,5	18	6,06
I_2 , A	8,55	8,5	8,25	7,5	5,5	3,3

Изходящата мощност се колебае от 372 VA до минимални стойности от порядъка на 2 VA при $x=0,1$ mm.

Получените резултати от лабораторните измервания потвърждават теоретичните, получени след решаването на уравнение (2.15), независимо от приетите опростявания.

Относителната грешка между лабораторните измервания и теоретичните изчисления е показана в следващата таблица 2.9.

От таблицата се вижда, че при изменение на x от 16 до 1 mm относителната грешка е в рамките на 5%. Увеличаването на грешка при междинна на шунта $x = 0,2$ и 0,1 mm се обяснява с невъзможността да се измерят достатъчно точно

Табл. 2.9

x, mm	16	6	2,4	1	0,2	0,1
U_{2T} , V	44,62	42,43	38,01	30,77	14,63	9,855
$U_{2Д}$, V	43,5	42,5	40	31,5	18	6,06
$\Delta = \frac{U_{2Д} - U_{2T}}{U_{2Д}} 100, \%$	-2,57%	0,165%	4,975%	4,76%	18,7%	-62,6%

средните разстояния на шунта от магнитопровода на трансформатора, вследствие грапавостта на магнитопровода и шунта.

Изводи към глава втора

1. Теоретично и експериментално са потвърдени основните характеристики на образца – трансформатор с магнитен шунт.

2. Възприетите ограничителни условия при теоретичния анализ са допустими, потвърдени с близостта на измерените и изчислени данни за вторичното напрежение.

3. Количествените резултати при теоретичните и експериментални изследвания потвърдиха реалната възможност за създаване на устройство с магнитен шунт за безконтактно управление и регулиране на електрически товари, еднофазно с малка мощност и ниско напрежение.

ГЛАВА III - ИЗСЛЕДВАНЕ ВЪЗМОЖНОСТИТЕ ЗА РАБОТА НА МАГНИТНИЯ ШУНТ КАТО МАКСИМАЛНОТОКОВА ЗАЩИТА

Разработена е нова идея за токови защиты с независима и/или зависима характеристика, синтезирана с феромагнитно устройство и магнитен шунт.

III.1 Принцип на действие

Разглежда се отново заместващата схема, показана на фиг.2.2. Полученото от нея по метода на контурните токове уравнение, за магнитодвижещото напрежение, създавано от първичната намотка w_1 и тока протичащ през нея е,

$$\dot{F}_1 = \dot{\Phi}_1 R_{m1} + \dot{\Phi}_{ш} R_{ми} . \quad (3.1)$$

Замествайки Φ_1 , с неговата максимална стойност $\Phi_1 = \frac{U_{1m}}{w_1 \omega} \cos \omega t$ при $\cos \omega t = 1$ и тока $\dot{I}_1$ изразен от уравнението за магнитното равновесие в захранващото устройство: $\dot{F}_1 - \dot{F}_2 \approx w_1 \dot{I}_1 - w_2 \dot{I}_2 \approx 0$, $\dot{I}_1 = \frac{w_2}{w_1} \dot{I}_2$ в (3.1), уравнението придобива вида,

$$w_1 \dot{I}_2 - \frac{\dot{U}_1}{w_1 \omega} R_{m1} = \dot{\Phi}_{ш} R_{ми} . \quad (3.3)$$

Решавайки (3.3) спрямо магнитния поток през шунта $\Phi_{ш}$, ще се получи зависимостта между потока през $\Phi_{ш}$ и тока през вторичната намотка I_2 ,

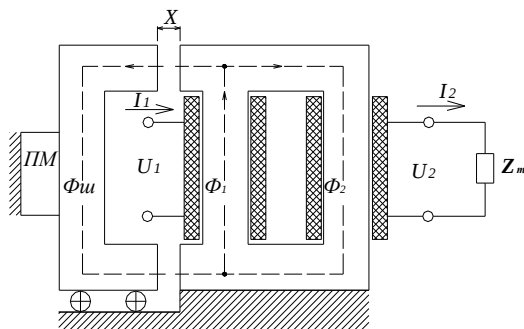
$$\dot{\Phi}_{ш} = \frac{w_2 \dot{I}_2 - \frac{\dot{U}_1}{w_1 \omega} R_{m1}}{R_{ми}} = \frac{w_2 w_1 \omega \dot{I}_2 - \dot{U}_1 R_{m1}}{w_1 \omega R_{ми}} \quad (3.4)$$

От изведената зависимост се вижда, че големината на отклонения магнитен поток през магнитния шунт $\Phi_{ш}$, нараства при увеличаване на вторичния ток I_2 , който е и тока през товара.

В електромагнитния механизъм, силата на привличане е пропорционална на квадрата на магнитния поток, в случая на $\Phi_{ш}^2$. Възползвайки се от изведената зависимост на магнитния поток през шунта $\Phi_{ш}$ от вторичния ток на трансформатора I_2 (3.4), може да се изобрази графично зависимостта между силата на привличане на шунта $f_{ем}$ от тока I_2 през вторичната намотка.

Възможно е да се намерят конструктивни решения, при които за стойност на работния ток $I_2 \geq I_{2доп}$ да се осъществи привличане на шунта към основния магнитопровод, при което изходящото напрежение U_2 и изходящия ток I_2

рязко намаляват. За тази цел магнитният шунт трябва да бъде подвижен. Едно възможно принципно решение е показано на фиг. 3.2. В случая шунтът е поставен върху шейна с търкалящи лагери. Така се осъществява неговото преместване към магнитопровода и в обратна посока.



Фиг. 3.2. Принципна схема за използване на магнитен шунт като максималнотокова защита

За да работи нормално захранващото устройство, т.е. да захранва с номинални параметри електрическия товар е необходимо магнитният шунт да отстои от магнитопровода на определено разстояние. Възможни са различни конструктивни решения за тази цел. В случая, на фиг.3.2, магнитният шунт се задържа в нормално положение от постоянен магнит. Когато силата на привличане към основния магнитопровод, обусловена от $\Phi_{ш}$ преодолее противодействието на постоянния магнит, шунтът се отделя от него и практически без или с малка съпротивителна сила и с нарастващо ускорение се насочва към крайното си положение. При тази крайна позиция, $x \rightarrow 0$ и изходящото напрежение U_2 е близко до нула.

III.2. Теоретично изследване

За да се получи аналитично характерната за максималнотоковата защита времетокова характеристика, се използват направените във втора глава опростяващи предположения, като се приема, че след отделянето си от постоянния магнит, магнитният шунт се движи без триене, под действието само на силата, създадена от $\Phi_{ш}$:

Ако за контура на първичната намотка на еднофазния трансформатор, показан на фиг. 2.1 се приложи втория закон на Кирхоф се получава:

$$u_1 + e_1 + e_{s1} = i_1 r_1, \quad u_1 = -e_1 + i_1 r_1 - e_{s1},$$

където: $u_1 = U_M \sin \omega t$ е захранващото синусоидално напрежение на първичната страна на трансформатора; e_1 е индуктираното електродвижещо напрежение в първичната намотка от основния магнитен поток Φ_1 ; e_{s1} е индуктираното електродвижещо напрежение в първичната намотка от магнитния поток на разсейване Φ_{s1} ; i_1 -тока през първичната намотка; r_1 -активното съпротивление на първичната намотка;

Пренебрегвайки активното съпротивление на намотките и потоците на разсейване, уравнението за равновесие на напреженията в първичната намотка е, $u_1 \approx -e_1$.

Изразявайки e_1 с магнитния поток Φ_1 и използвайки първия закон на Кирхоф, за u_1 се получава уравнението,

$$u_1 = w_1 \frac{d\Phi_2}{dt} + w_1 \frac{d\Phi_{uu}}{dt}. \quad (3.6)$$

За напрежението на вторичната намотка u_2 след подобни замествания получаваме,

$$u_2 = -\left(-w_2 \frac{d\Phi_2}{dt}\right) = w_2 \frac{d\Phi_2}{dt}. \quad (3.8)$$

Ако изразим u_2 чрез товара му $z = R_2$ и тока през вторичната намотка i_2 , $u_2 = i_2 R_2$, и го заместим в (3.8) то придобива вида,

$$i_2 R_2 = w_2 \frac{d\Phi_2}{dt}. \quad (3.10)$$

След заместване $\frac{d\Phi_2}{dt}$ в уравнение (3.6) за първичното напрежение u_1 ще се получи изрази:

$$u_1 = w_1 \frac{i_2 R_2}{w_2} + w_1 \frac{d\Phi_{uu}}{dt} = w_1 \left(\frac{R_2 i_2}{w_2} + \frac{d\Phi_{uu}}{dt} \right) \quad (3.11)$$

Замествайки u_1 , със запис му като синусоидална функция в (3.11) се получава,

$$\frac{R_2 i_2}{w_2} + \frac{d\Phi_{uu}}{dt} = \frac{U_{uu}}{w_1} \sin(\omega t + \theta) \quad (3.12)$$

Изразявайки i_2 чрез потока през шунта и неговите параметрите, след заместване в (3.12) се получава зависимостта:

$$R_2 \frac{\Phi_{uu}}{w_2^2 S_{uu} \mu_0} 2x + \frac{d\Phi_{uu}}{dt} = \frac{U_m}{w_1} \sin(\omega t + \theta). \quad (3.16)$$

Полученото уравнение (3.16) дава функционалната зависимост между разстоянието x на въздушната междина и големината на магнитния поток Φ_{uu} в нея и моментната стойност на захранващото напрежение ($u_1 = U_m \sin(\omega t + \theta)$).

Силата на привличане на шунта в случая при две въздушни междини, (фиг. 3.2) трябва да бъде два пъти по-голяма. Определя се по формула (3.18), а ускорението, което ще придобие шунта под действието на магнитния поток през шунта Φ_{uu} е:

$$f_{em} = 2 \frac{1}{2} \frac{\Phi^2}{\mu_0 S} = \frac{\Phi^2}{\mu_0 S}, \quad (3.18) \quad \frac{d^2 x}{dt^2} = -\frac{F}{m_{uu}} = \frac{\mu_0 S_{uu}}{m_{uu}} = -\frac{\Phi_{uu}^2}{S_{uu} m_{uu} \mu_0}. \quad (3.19)$$

С този израз се определя ускорението, което ще придобие при своето движение магнитният шунт, когато силата на привличане f_{em} стане по-голяма от силата на постоянния магнит $f_{пм}$, който задържа магнитния шунт в неподвижно отворено състояние. В този случай $x \leq x_{max}$.

Когато магнитния шунт е неподвижен в начално положение $x = x_{max}$, то

$$f_{пм} > f_{em} = \frac{\Phi_{uu}^2}{S_{uu} \mu_0}, \text{ а ускорението } \frac{d^2 x}{dt^2} = 0.$$

При нормална работа на захранващото устройство (при номинален товар), магнитния шунт трябва да отстои на разстояние $x_{\max}$. При това разстояние са изчислени номиналните параметри на устройството. Вторично напрежение е равно на U_{2n} .

Възползвайки се от основни зависимости, използвани нееднократно в текста за $\Phi_{ш}$ се получава,

$$\Phi_{ш} = \frac{w_1 i_1 \mu_0}{l} S_{ш}, \text{ а за } f_{ем} :$$

$$f_{ем} = \frac{\left(\frac{w_1 i_1 \mu_0}{l} S_{ш} \right)^2}{\mu_0 S_{ш}} = \frac{w_1^2 i_1^2 \mu_0}{l^2} S_{ш}$$

Във формулата с l е означена дължината на магнитната верига, включваща дължината на шунта и дължината на двете въздушни междини $2x_{\max}$. Или $l = l_{ш} + 2x_{\max}$.

Тъй като магнитното съпротивление на въздуха е много по-голямо от това на стоманения магнитопровод, може да се приеме, че дължината $l \approx 2x_{\max}$. Тогава за силата на привличане $f_{ем}$, може да се определи със зависимостта,

$$f_{ем} = \frac{w_1^2 i_1^2 \mu_0}{(2x_{\max})^2} S_{ш} = \frac{w_1^2 i_1^2 \mu_0}{4x_{\max}^2} S_{ш} \quad (3.21)$$

Въвеждайки ефективната стойност на тока I_1 , то тази зависимост придобива вида,

$$f_{ем} = \frac{w_1^2 I_1^2 \mu_0}{2x_{\max}^2} S_{ш}. \quad (3.22)$$

За да може постоянният магнит да задържа неподвижен магнитния шунт, при работа на захранващото устройство с номинални параметри е необходимо силата на привличане на постоянния магнит да бъде по-голяма или равна на силата $f_{ем}$, т.е.

$$f_{пм} \geq f_{ем} = \frac{w_1^2 I_1^2 \mu_0}{2x_{\max}^2} S_{ш} \quad (3.23)$$

III.3. Изследване на динамичните параметри на защитата

Динамиката в работата на устройството се характеризира с времето за нарастване на тяговата сила $f_{ем}$, до стойност преодоляваща силата на постоянния магнит $f_{пм}$.

Уравнение (3.16) може да се разгледа за тези два интервала от време.

А. Първият интервал t_1 е от 0 до Δt , където Δt е моментът, в който електромагнитната сила на привличане на шунта преодолява противодействието на постоянния магнит:

$$\frac{2R_2 x_{\max} \Phi_{ш}}{w_2^2 \mu_0 S_{ш}} + \frac{d\Phi_{ш}}{dt} = \frac{U_m}{w_1} \sin(\omega t + \theta) \text{ с начално условие } \Phi_{ш}(0) = 0$$

В. Вторият интервал е за времето $t_2 > \Delta t$. Това е времето, след което шунта започва да се придвижва към магнитопровода на трансформатора и разстоянието x намалява от $x_{\max}$ до 0.

Уравнението (3.16) има вида,

$$\frac{2R_2 x \Phi_w}{w_2^2 \mu_0 S_w} + \frac{d\Phi_w}{dt} = \frac{U_w}{w_1} \sin(\omega t + \theta) \text{ а ускорението } \frac{d^2 x}{dt^2} = - \frac{\Phi_w^2}{\mu_w S_w \mu_0}$$

с начални условия: $\Phi_w(\Delta t) = \sqrt{F_{\text{IIM}} S_w \mu_0}$; $x(\Delta t) = x_{\max}$; $\left(\frac{dx}{dt}\right)_{t=\Delta t} = 0$

Получената система от уравнения е нелинейна и е удобно да се търсят числени решения за конкретни образци. Тук е подходящ метода на последователните интервали, който може да се приложи и за интервала от т. А.

За анализиране на динамиката е разработен образец на захранващо устройство със следните технически параметри: P_1 -номинална вторична мощност - 330 W; I_1 -номинален първичен ток, А; I_2 -номинален вторичен ток, А; U_1 -номинално напрежение на първичната намотка - 380 V; U_2 -номинално напрежение на вторичната намотка - 42 V; w_1 -брой на навивките в първичната намотка - 660; w_2 -брой на навивките във вторичната намотка; S_w -сечение на шунта- $2,10^{-3} \text{ m}^2$; m_w -маса на шунта 3,36 кг.; R_2 -товар на вторичната намотка, Ω ; $R_2 = R_H = 5,3$; $R_2 \neq R_H$; ω -ъглова честота на захранващото напрежение, $\omega = 2\pi f = 314$; θ -начална фаза;

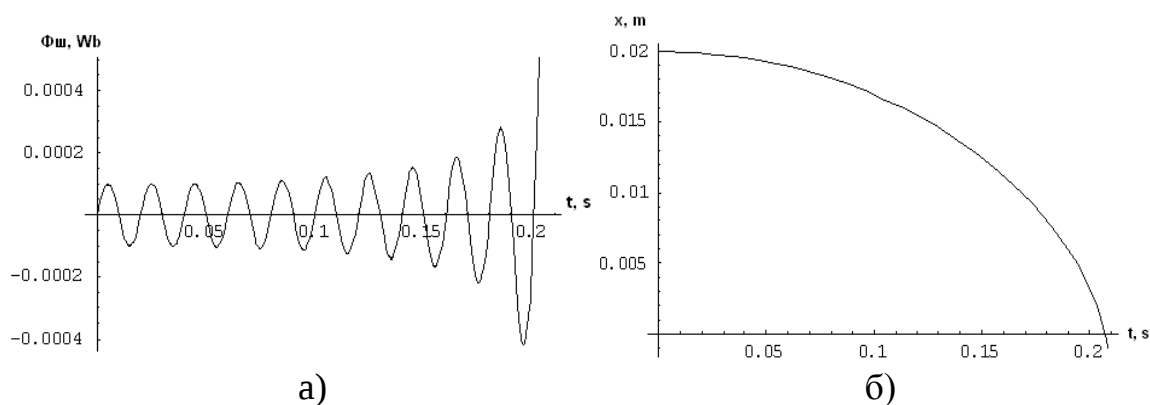
Динамичните параметри са изследвани с изчислителна техника. За решаване на получената нелинейна система е използван програмния продукт Математика (5,6), като за целта е създадена програмата.

Системата от уравнения е решена с използване на програмата при различни стойности на товара R_2 . За създадения образец номиналният товар е $R_{2H} = 5,34 \Omega$. Задаваните стойности на номиналния товар и ъгъла на началната фаза θ са посочени в следващата таблица. таб. 3.1.

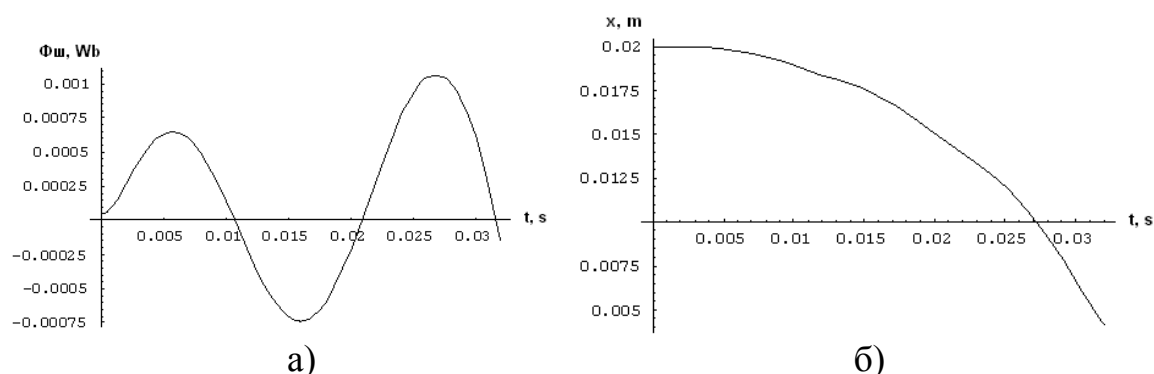
таб. 3.1

Товар, R_2, Ω	$R_2 = R_H = 5,34$	$R_2 = 0,75 R_{2H}$	$R_2 = 0,5 R_{2H}$	$R_2 = 0,25 R_H$	$R_2 = 0,6 \Omega$	$R_2 = 0,2 \Omega$
Начална фаза, θ°	$0, \frac{\pi}{2}; \frac{3\pi}{2}, \pi$	$0, \frac{\pi}{2}; \frac{3\pi}{2}, \pi$	$0, \frac{\pi}{2}; \frac{3\pi}{2}, \pi$	$0, \frac{\pi}{2}; \frac{3\pi}{2}, \pi$	$0, \frac{\pi}{2}; \frac{3\pi}{2}, \pi$	$0, \frac{\pi}{2}; \frac{3\pi}{2}, \pi$
$t_{ш}, \text{S}$	∞	0,208	0,172	0,085	0,027	0,0162

Получените решения са в графичен вид и са показани две от тях на следващите фигури, фиг. 3.4 и фиг. 3.7. На първата фигура 3.4 а е показано изменението на магнитния поток през магнитния шунт Φ_w , по време на движението на шунта, от $x = x_{\max}$ до $x = 0$. Втората фигура 3.4 б, показва времето, за което магнитния шунт изминава разстоянието x , при товар $R_2 = R_H$ и $\theta = \text{const} = 0$



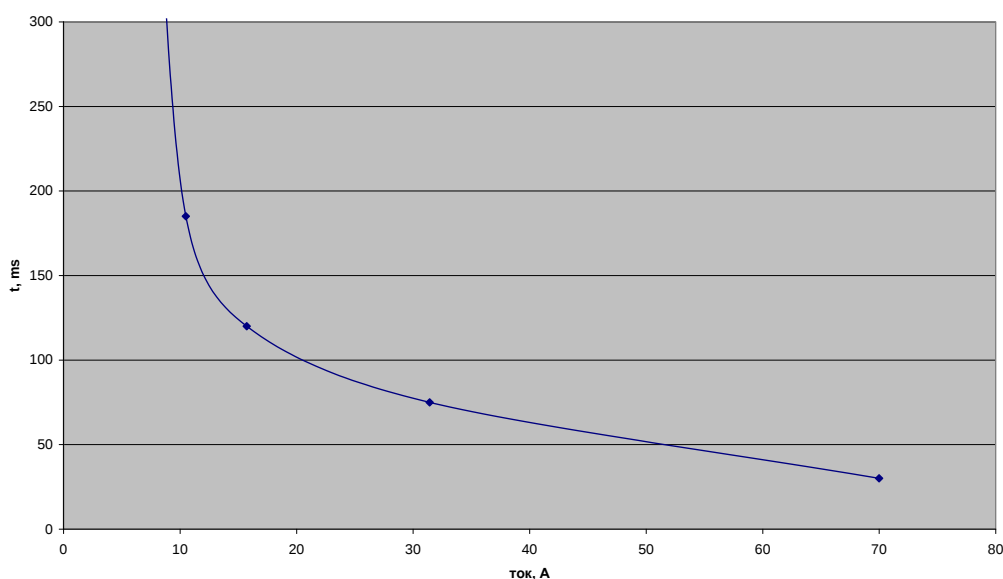
Фиг. 3.4 ($R_2=0,75R_H=4,0 \Omega$; $I_{1H}=1,19 \text{ A}$; $\theta=0^\circ$; $x=x_{\max}=20\text{mm}$)



фиг. 3.7 ($R_2=0,6\Omega$; $I_{1H}=1,19 \text{ A}$; $\theta=0^\circ$; $x=x_{\max}=20\text{mm}$)

Теоретична зависимост, на времето за придвижване на шунта от големината на товара по данните посочени в таб. 3.1 е показана на следващата фигура 3.9.

Показаната на фиг. 3.9 графика има типична форма на времезависима характеристика на токова защита. С това се потвърждава предварително доказаната възможност, че подвижния шунт може да бъде използван за защита от ненормални режими на захранващо устройство, т.е. като максималнотокова защита със зависима характеристика.



Фиг. 3.9

III.4. Лабораторни изследвания на разработения опитен образец на захранващо устройство с магнитен шунт.

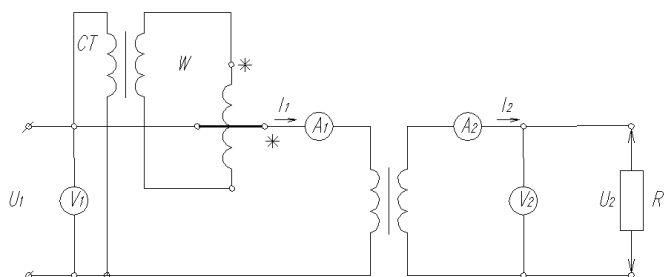
III.4.1. Експериментално определяне на основни статични параметри на устройство с магнитен шунт.

На разработения опитен образец са направени лабораторни измервания, за определяне на основни параметри, на захранващото устройство. Измерванията са направени при всички възможни режими на работа. Техническите параметри на захранващото устройство са дадени в т. 3.3.

III.4.1.1 Работа при номинален товар.

За да бъдат измерени параметрите на захранващото устройство при номинален товар, на първичната намотка се подава номинално напрежение $U_{1н}$, а във вторичната намотка е включен номиналният товар $z_{2н} = R_n$.

На фиг. 3.10 е показана схемата на опитната постановка.



Фиг. 3.10

Измерените величини имат следните стойности: напрежение на първичната намотка $U_1 = 380V$; напрежение на вторичната намотка $U_2 = 41,5V$; първичен ток- $I_1 = 1,13A$; вторичен ток- $I_2 = 7,95A$; консумирана активна мощност от мрежата $P_1 = 363,2W$

III.4.1.2. Определяне на мощността на празен ход P_0 на захранващото устройство.

Схемата на опитната постановка за измерване на мощността на празен ход P_0 е показана на фиг. 3.10, в която е изключен товара R_n , а шунтът е отделен от магнитопровода на трансформатора.

Получените резултати имат следните стойности: напрежение на първичната намотка $U_1 = 380 V$; ток на празен ход $I_{10} = 0,38A = 33,63\%$; консумирана активна мощност при празен ход $P_0 = 9,265 W$;

$$\cos \varphi_0 = \frac{P_0}{U_1 I_{10}} = 0,064.$$

III.4.1.3. Измерване на параметрите на захранващото устройство в режим на к.с.

Схемата на опитната постановка за измерване на мощността на късо съединение е показана на фиг. 3.10, като $R_n = 0$. Т.е. намотката е свързана

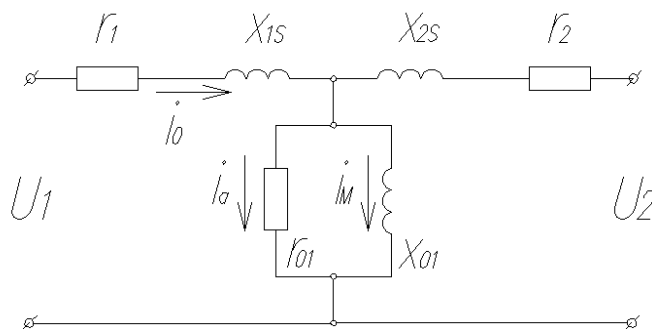
накъсо. За да се получат необходимите параметри, напрежението на първичната намотка се увеличава плавно, до достигане на големина на тока през първичната намотка $I_1 = I_{1н} = 1,13A$.

При достигане на номиналния първичен ток $I_{1н}$ се отчита големината на подаденото напрежение на първичната намотка $U_{1к} = 105V$. Измерената стойност на мощността на късо съединение е: $P_{кс} = 25,11W$.

III.4.1.4. Изчисляване на основните параметри, характеризиращи захранващото устройство.

След направените лабораторни измервания могат да се изчислят и стойностите на други технически параметри, характеризиращи захранващото устройство.

Приема се най-често използваната заместваща схема на трансформаторите. Тя е показана на фиг. 3.11, на която са означени следните елементи: r_1 -активно съпротивление на първичната намотка; x_{1s} -индуктивно съпротивление на разсейване на първичната намотка; r_2 -активно съпротивление на вторичната намотка; x_{2s} -индуктивно съпротивление на разсейване на вторичната намотка; r_{01} -активно съпротивление, характеризиращо загубите на празен ход в стоманата /токове на Фуко/ на магнитопровода при протичане на активната съставяща на тока на празен ход i_a ; x_{01} -индуктивно съпротивление, характеризиращо големината на намагнитващия ток i_μ (на намагнитващата мощност).



фиг. 3.11

От измерените в т. III. 4. статични параметри на захранващото устройство са определени: активната и намагнитващата съставяща на тока на празен ход $I_a = 0,0244 A$ и $I_\mu = 0,379 A$; $r_{01} = 15562 \Omega$ и $x_{01} = 1002,63 \Omega$; $L_{01} = 3,19 H$; $U_k \% = 27,63\%$; $z_k = 92,92\Omega$; $r_{mp} = 19,665\Omega$; $x_{mp} = 90,815\Omega$

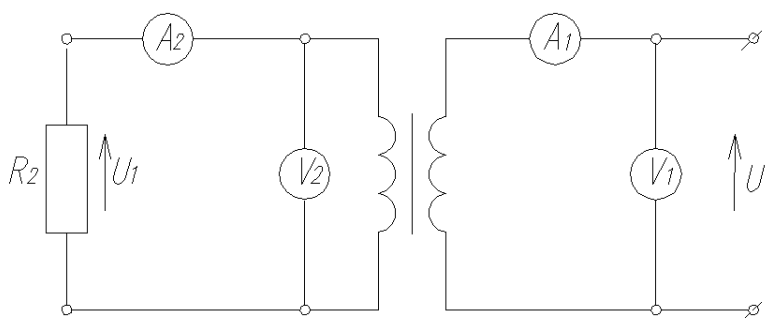
III.4.2. Експериментално определяне на времетоковата характеристика на максималнотоковата защита на захранващото устройство.

На фиг. 3.9 е показана получената по изчислителен път теоретична характеристика на максималнотоковата защита, реализирана с магнитния шунт

в разработеното захранващо устройство, която по характер е аналогична на конвенционалните максималнотокови защиты.

На разработеният образец на захранващо устройство с основен елемент магнитен шунт са проведени лабораторни измервания, за заснемане на действителната времетокова характеристика.

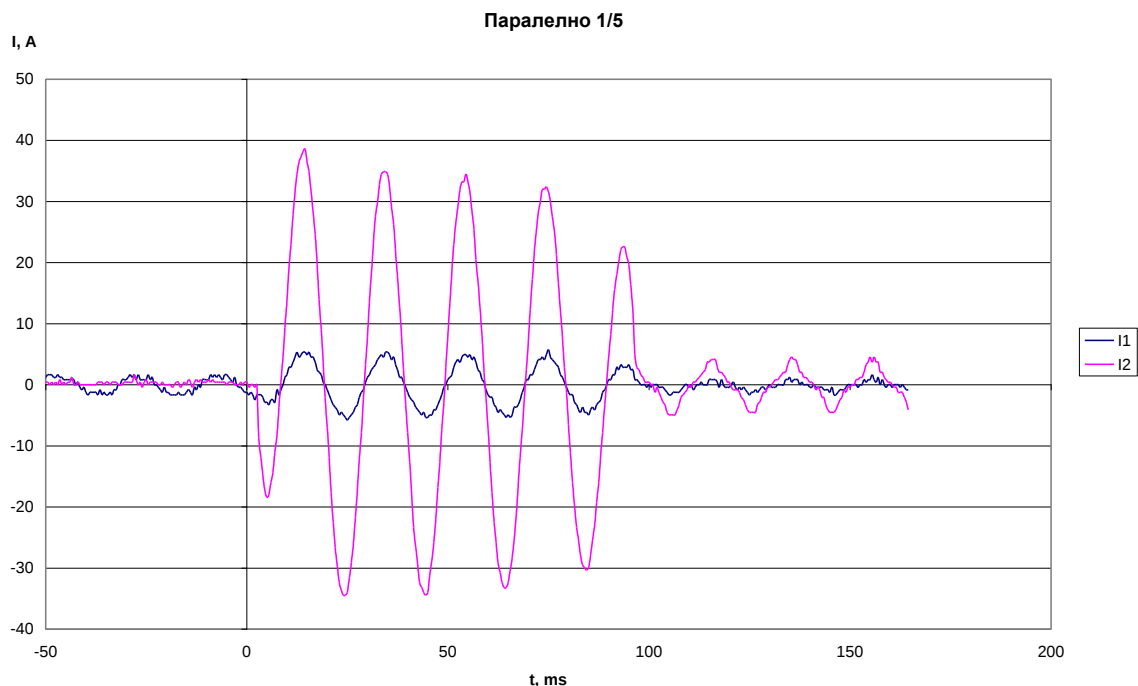
Схемата на опитната постановка принципно е показана на фиг. 3.13, но освен с амперметри, токовете са регистрирани и със записи във функция от времето от апарат MULTIVER 3SN.



фиг. 3.13

При проведените лабораторни измервания са имитирани значителни нараствания на тока във вторичната намотка. Измерванията са проведени при две стойности на съпротивлението на к.с., $R_2 = 0,75 \Omega$ и $R_2 = 0,24 \Omega$. При всяка стойност на съпротивлението R_2 са проведени по пет измервания, за поточно определяне на времето на задействане на максималнотоковата защита, реализирана с магнитния шунт. Получените резултати за големините на първичния ток I_1 и вторичния ток I_2 на захранващото устройство са записани и с мрежов анализатор MULTIVER 3SN.

На фиг. 3.14 е показана осцилограмата на изменението на токовете I_1 и I_2 при първото измерване и товар $R_2 = 0,75 \Omega$. По изменението на токовете може да се отчете с приближение времето, за което реагира максималнотоковата защита.



фиг. 3.14

От направените записи на всички фигури се виждат три ясно изразени режима от работата на захранващото устройство. Първият с продължителност t_1 , съответства на работата на устройството в режим на празен ход. Големината на тока I_1 е равна на тока на празен ход I_0 , а I_2 е равен на нула в интервала $(-50 \div 0^+)$ по абсисата.

Вторият режим с продължителност t_2 , съответства на режима на рязко нарастване на тока, пример късо съединение. В началото на този интервал вторичната намотка се свързва през съпротивление $0,75 \Omega$ /фиг. 3.14 ÷ 3.17/ и през съпротивление на товара $0,24 \Omega$ /фиг. 3.18 – 3.23/. В момента, когато големината на тока I_1 , създаде сила на привличане на шунта f_{em} , по-голяма от силата на постоянния магнит, който задържа шунта в неподвижно състояние, започва движението на магнитния шунт към магнитопровода. В края на този интервал приключва неговото движение. Той се е допрял до магнитопровода и тока през вторичната намотка рязко намалява, независимо, че вторичната намотка е свързана практически накъсо през посочените по-горе съпротивления. Това е началото на интервала t_3 .

Във втория интервал се забелязва непрекъснато намаляване на тока на късо съединение, което за претоварената по ток верига е много благоприятно. Това намаляване е в резултат от придвижването на магнитния шунт към ядрото на магнитопровода, на което е навита първичната намотка на захранващото устройство.

Такова непрекъснато намаляване на тока при претоварване, при използването на други видове защиты не се наблюдава.

Дължината на интервала t_2 , съответства приблизително на времето на задействане на защитата. Измерените приблизителни стойности за интервала t_2 , при различните съпротивления са посочени в следващата таблица 3.2.

Таб. 3.2

Пореден опит		$t_{(1)}$	$t_{(2)}$	$t_{(3)}$	$t_{(4)}$	$t_{(5)}$	t_{cp}
t_2 , ms	$R_2=0,75\Omega$	95	115	115	110	115	111
при	$R_2=0,24\Omega$	70	50	75	70	60	65

В последната колона на таблицата е посочено средното време на задействие, при направените по пет измервания за различните стойности на съпротивлението на товара R_2 .

Получените средни времена са в рамките на времената на задействие на класическите електромагнитни защиты.

Изводи към трета глава

1. Теоретичните изследвания и направените лабораторни измервания потвърждават идеята за възможността да бъде използван магнитен шунт за безконтактна максималнотокова защита с ограничаване на времето на протичане на свръхтока.

2. По принцип е доказано, че може да се синтезира времезависима характеристика във функция от големината на тока.

3. Предимството на ограничаването на тока осъществено от магнитния шунт е, че за времето на реакция на защитата, моментните стойности на токовете в първичната I_1 и във вторичната I_2 намотка следват тренд за намаление.

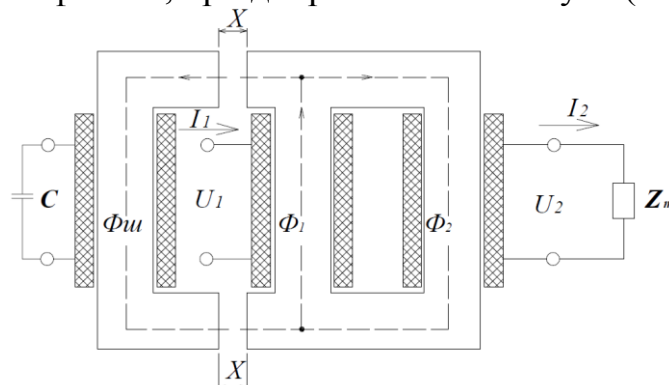
IV. ВЪЗМОЖНОСТ ЗА ПОВИШАВАНЕ НА ЕФЕКТИВНОСТТА МАГНИТНИЯ ШУНТ

От направените теоретични изследвания в глава 2 се доказва, че при намаляване на разстоянието x , напрежението U_2 намалява значително спрямо $U_{2н}$, но не е равно на нула. За да се подобри работата на захранващото устройство, е необходимо напрежението U_2 да получава и нулева стойност

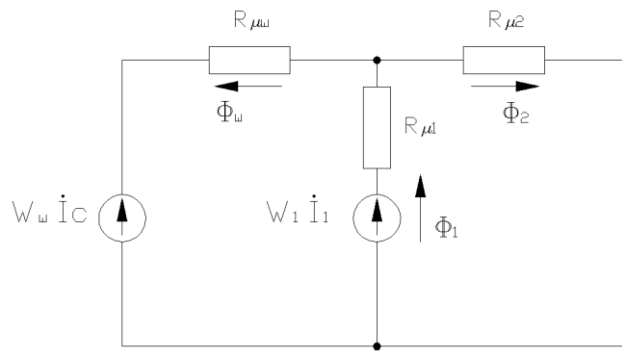
4.1. Анализ на ефективността на магнитен шунт с допълнителна намотка.

Един възможен начин за повишаване ефективността на шунта е показан с принципната схема на фиг.4.1.

На фигура 4.2, е показана заместващата схема на захранващото устройство, показано на фиг.4.1, при допрян магнитен шунт ($x = 0$).



фиг.4.1



Фиг.4.2

За тази заместваща схема можем да се запишат следните уравнения. По първия закон на Кирхоф

$$\dot{\Phi}_1 = \dot{\Phi}_2 + \dot{\Phi}_w, \quad /4.1/$$

а по вторият закон на Кирхоф:

$$w_1 \dot{I}_1 - w_u \dot{I}_c = \dot{\Phi}_1 R_{\mu 1} + \dot{\Phi}_w R_{\mu u} \quad /4.2/$$

$$w_1 \dot{I}_1 = \dot{\Phi}_1 R_{\mu 1} + \dot{\Phi}_2 R_{\mu 2}. \quad /4.3/$$

За $\dot{E}_c$ и $\dot{I}_c$ можем да запишем: $\dot{I}_c = \frac{\dot{E}_c}{x_c} = \frac{\dot{E}_c}{\frac{1}{j\omega C}} = \dot{E}_c j\omega C$; $\dot{E}_c = j\omega w_u \dot{\Phi}_w$

Решава се системата от уравнения спрямо $\dot{\Phi}_2$ и се получава:

$$\dot{\Phi}_2 = \frac{(R_{\mu u} - \omega^2 w_u^2 C)}{R_{\mu 2}} \dot{\Phi}_w \quad /4.5/$$

Получената зависимост показва връзката между магнитните потоци Φ_2 и Φ_w . От нея се вижда, че големината на магнитния поток Φ_2 зависи от стойността на множителя: $\frac{R_{\mu u} - \omega^2 w_u^2 C}{R_{\mu 2}}$.

От получената зависимост се вижда, че при зададена стойност на $\dot{\Phi}_1$, магнитния поток $\dot{\Phi}_2$ може да се нулира или дори да смени посоката си, при подходящо подбрани стойности на w_u, C и $R_{\mu u}$. Например ако $R_{\mu u} = \omega^2 w_u^2 C$, то $\dot{\Phi}_2$ ще бъде равно на нула а $\dot{\Phi}_w = \dot{\Phi}_1$, в съответствие с уравнение /4.1/

За потвърждение на казаното по-горе, с помощта на векторни диаграми са разгледани няколко случая, при допрян до основния магнитопровод магнитен шунт.

Нека означим разликата $R_{\mu u} - \omega^2 w_u^2 C$, като общо съпротивление на магнитния шунт, $R_{\text{мобцо}}$ и се анализира следния случай:

Режим на празен ход

В този режим съпротивлението на товара е равно на безкрайност ($R_m = \infty$) и са възможни следните случаи:

1. Нека $\omega^2 w_{ш}^2 C < R_{ми}$. Тогава $R_{ми} - \omega_{ш}^2 w_{ш}^2 C = R_{ми общо} > 0$. Ако приемем, че $R_{ми общо} = 0,1 R_{м2}$, след заместване в (4.5), връзката между потоците $\dot{\Phi}_2$ и $\dot{\Phi}_{ш}$ се описва с израз,

$$\dot{\Phi}_2 = \frac{0,1 R_{м2}}{R_{м2}} \dot{\Phi}_{ш} = 0,1 \dot{\Phi}_{ш}. \quad (4.6)$$

Ако полученият израз за $\dot{\Phi}_2$ в (4.6) се замести в уравнение (4.1), за $\dot{\Phi}_1$ се получава: $\dot{\Phi}_1 = 0,1 \dot{\Phi}_{ш} + \dot{\Phi}_{ш} = \frac{11}{10} \dot{\Phi}_{ш}$.

Получените отношения между потоците $\dot{\Phi}_1$, $\dot{\Phi}_2$ и $\dot{\Phi}_{ш}$ са показани на следващата фиг.4.4.

От разгледания случай се вижда, че при подходящо подбрани брой навивки и капацитет на кондензатора в шунтовата намотка, магнитния поток $\dot{\Phi}_2$ може да бъде намален.

2. Допуска се, че $\omega^2 w_{ш}^2 C = R_{ми}$. Тогава $R_{ми общо} = 0$, и $\dot{\Phi}_2 = 0$. Следователно от уравнение (4.1) се получава, че $\dot{\Phi}_1 = \dot{\Phi}_{ш}$.

Тогава напрежението на вторичната страна U_2 ще бъде равно на нула, а векторната диаграма ще има вида, показан на фиг. 4.5.

3. Нека $\omega^2 w_{ш}^2 C > R_{ми}$, а $R_{ми общо} < 0$.

В този случай магнитния поток $\dot{\Phi}_2$ ще има стойност различна от нула, но ще има посока обратна на потоците $\dot{\Phi}_1$ и $\dot{\Phi}_{ш}$. Това е показано на следващата векторната диаграма, фиг.4.6.

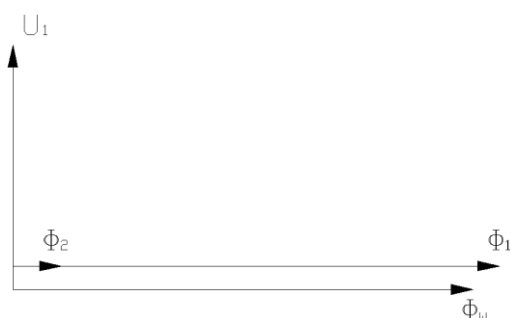
За да бъде спазен закона на Кирхоф, е необходимо магнитния поток $\dot{\Phi}_{ш}$ да е по-голям от $\dot{\Phi}_1$, с големината на $\dot{\Phi}_2$.

4. Възможен е и следния случай.

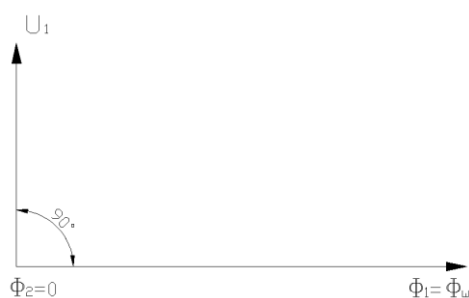
$\omega^2 w_{ш}^2 C > R_{ми}$ но $|R_{ми общо}| \rightarrow R_{м2}$. Тогава за резултантното магнитно съпротивление между паралелно свързаните $R_{ми общо}$ и $R_{м2}$ се получава, че клони

към безкрайност: $R_{ми2} = \frac{R_{ми общо} \cdot R_{м2}}{R_{ми общо} + R_{м2}} \rightarrow \infty$

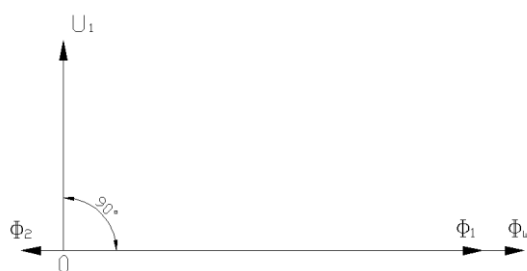
Намагнитващия ток през w_1 нараства много, а също така нарастват и потоците $\dot{\Phi}_2$ и $\dot{\Phi}_{ш}$. На практика такъв режим може да се получи поради влиянието на пренебрегнатите фактори.



Фиг.4.4



фиг.4.5



фиг.4.6

IV.2. Експериментално изследване

Направени са лабораторни измервания на захранващо устройство, с навита бобина на магнитния шунт и включен към нея кондензатор. При измерванията са отчетени ефективните стойности на първичното и вторичното напрежение U_1 и U_2 , големините на първичния и вторичния ток I_1 и I_2 , както и напрежението и тока на шунтовата намотка $U_{ш}$ и $I_{ш}$.

Измервания са направени при празен ход, номинален товар, и 60 % от номиналния товар с кондензатори в шунтовата намотка: $5\mu F$, $7\mu F$, $10\mu F$, $16\mu F$, $20\mu F$, $25\mu F$ и $30\mu F$. Получените резултати са дадени в таблиците от 4.1 до 4.22.

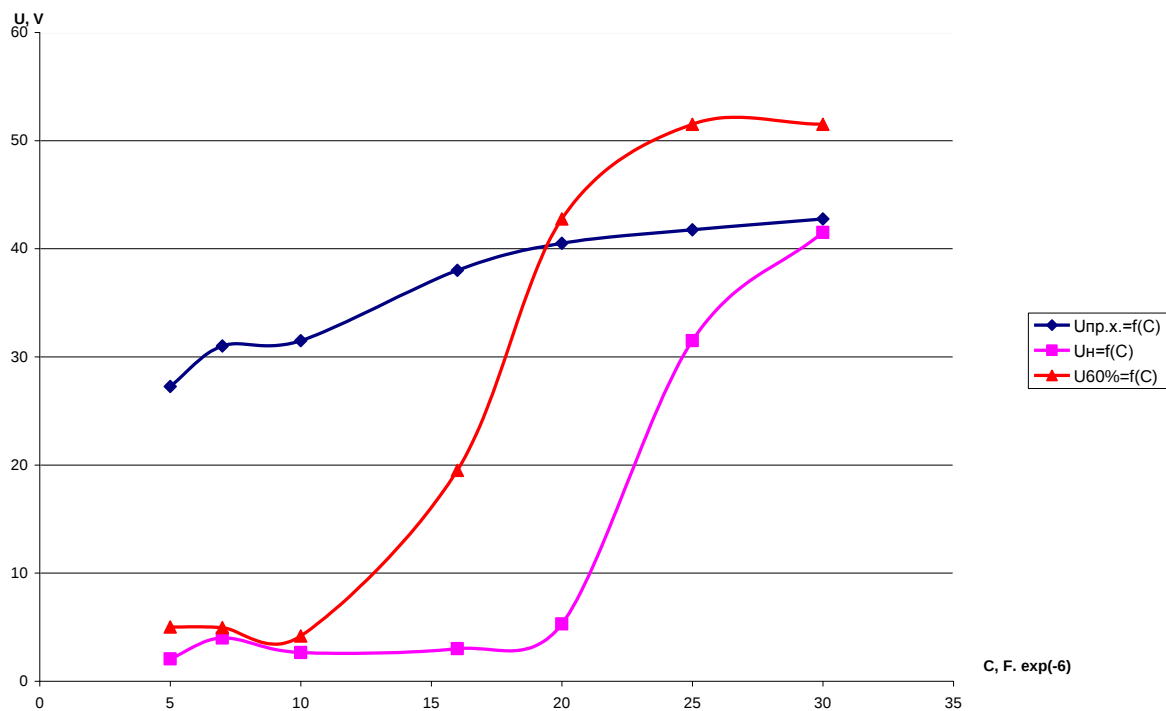
От данните в тях са построени следващите графики, показващи следните зависимости:

- между вторичното напрежение U_2 и капацитета на включения в шунтовата намотка кондензатор, фиг. 4.6;

- между тока I_2 във вторичната намотка и капацитета на кондензатора в шунтовата намотка, фиг. 4.7;

- между тока I_1 във първичната намотка и капацитета на кондензатора в шунтовата намотка, фиг. 4.8;

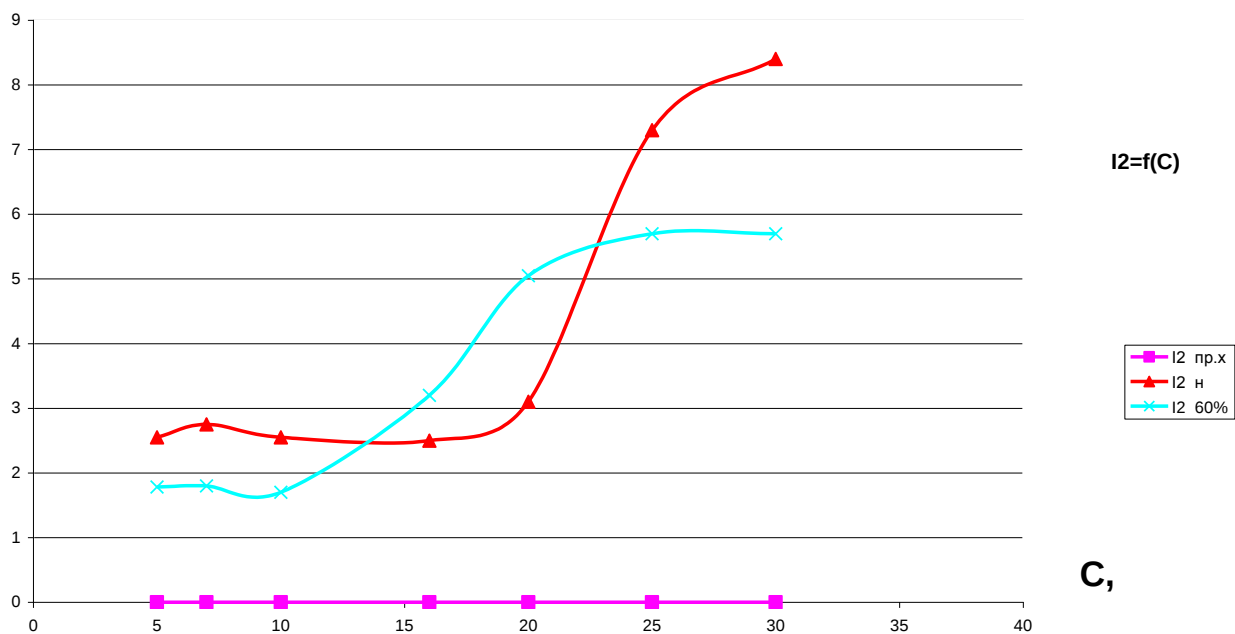
- между тока $I_{ш}$ във шунтовата намотка и капацитета на кондензатора в нея, фиг. 4.9.



1-пустой ход с включен шунт; 2- номинален товар с включен шунт;
3.- 60% товар с включен шунт

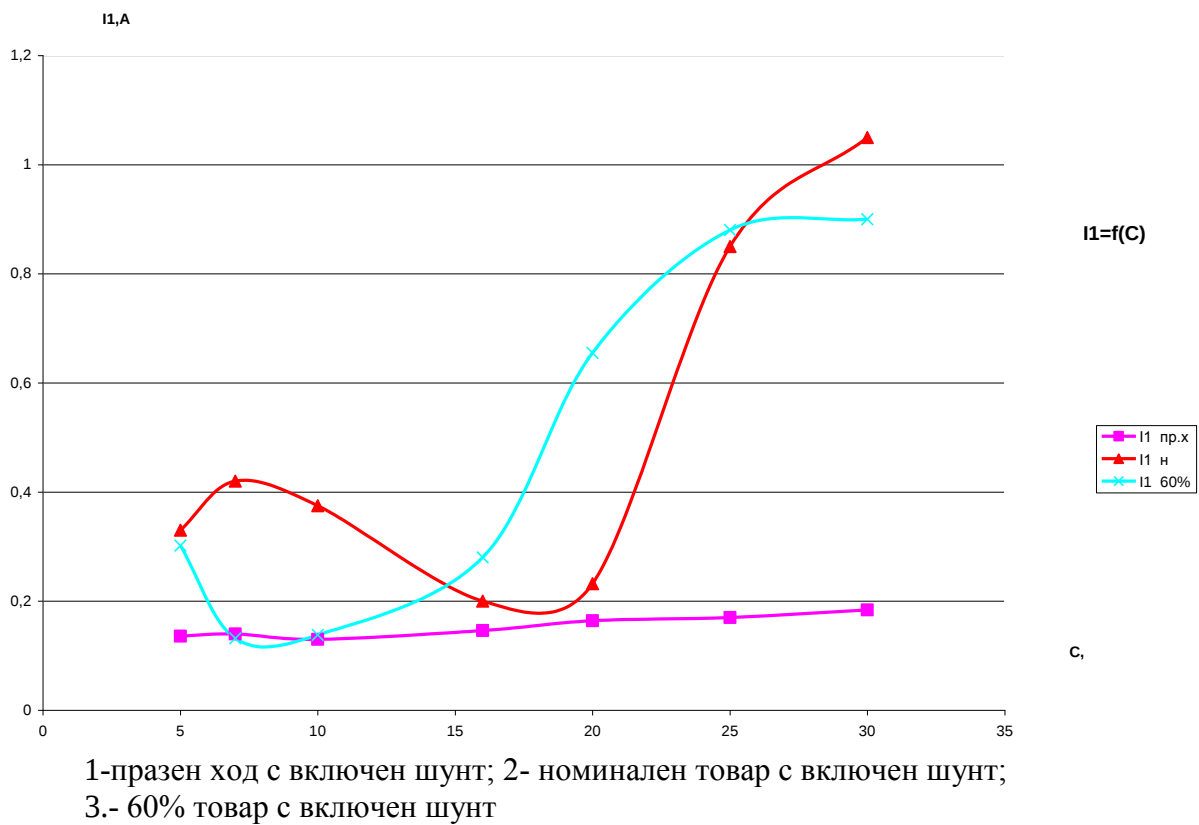
Фиг.4.6.

I_2, A

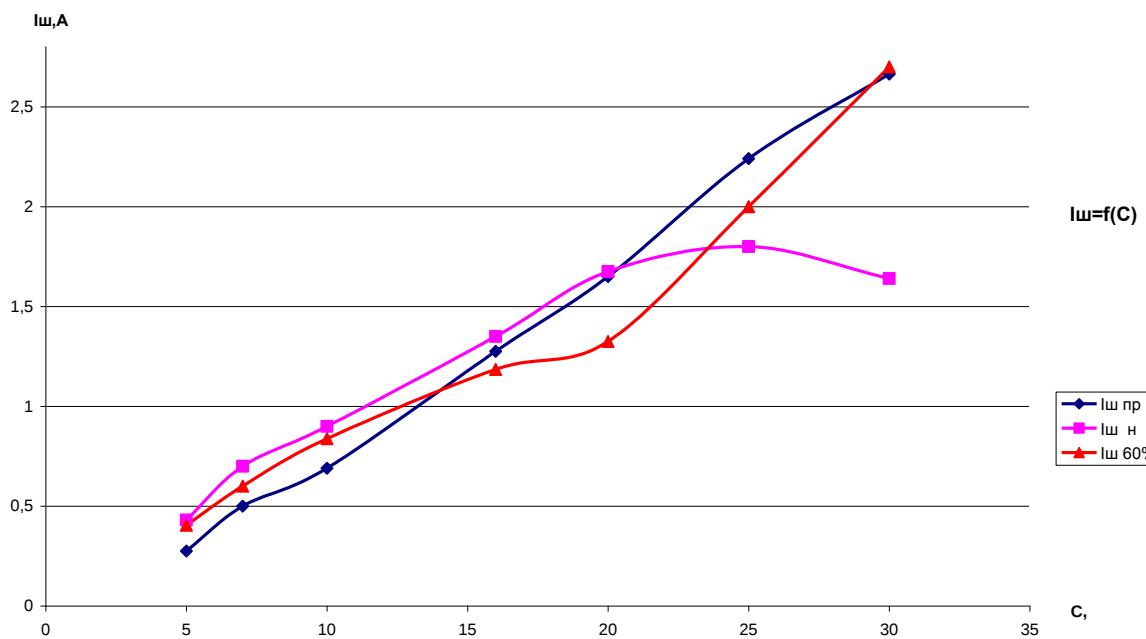


1-пустой ход с включен шунт; 2- номинален товар с включен шунт;
3.- 60% товар с включен шунт

Фиг.4.7



Фиг.4.8



Фиг.4.9

Всичките графики са построени при доближен шунт към магнитопровода.

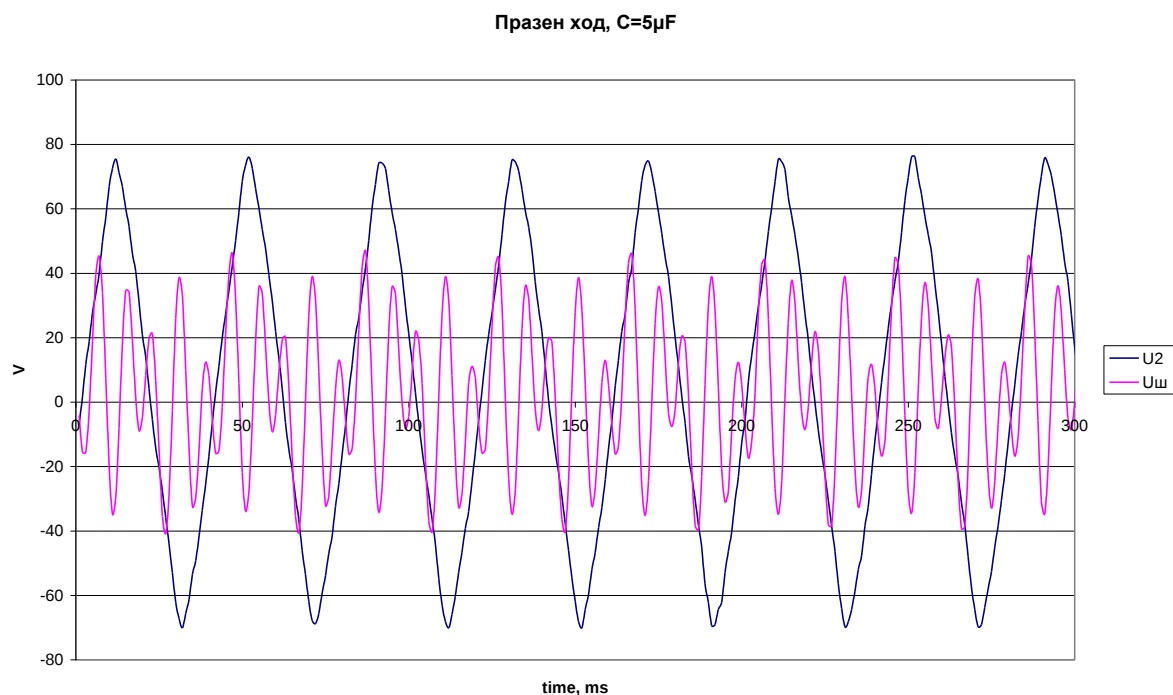
С помощта на мрежов анализатор MULTIVER 3SN са направени осцилограми за характерните параметри на образеца , при различни режими и кондензатори включени към шунтовата намотка:

- празен ход с отделен шунт;
- празен ход и ръчно преместване на шунта;
- празен ход, номинален товар и ръчно преместване на шунта;
- празен ход и внезапно нарастване на тока през съпротивление от $0,2\Omega$.

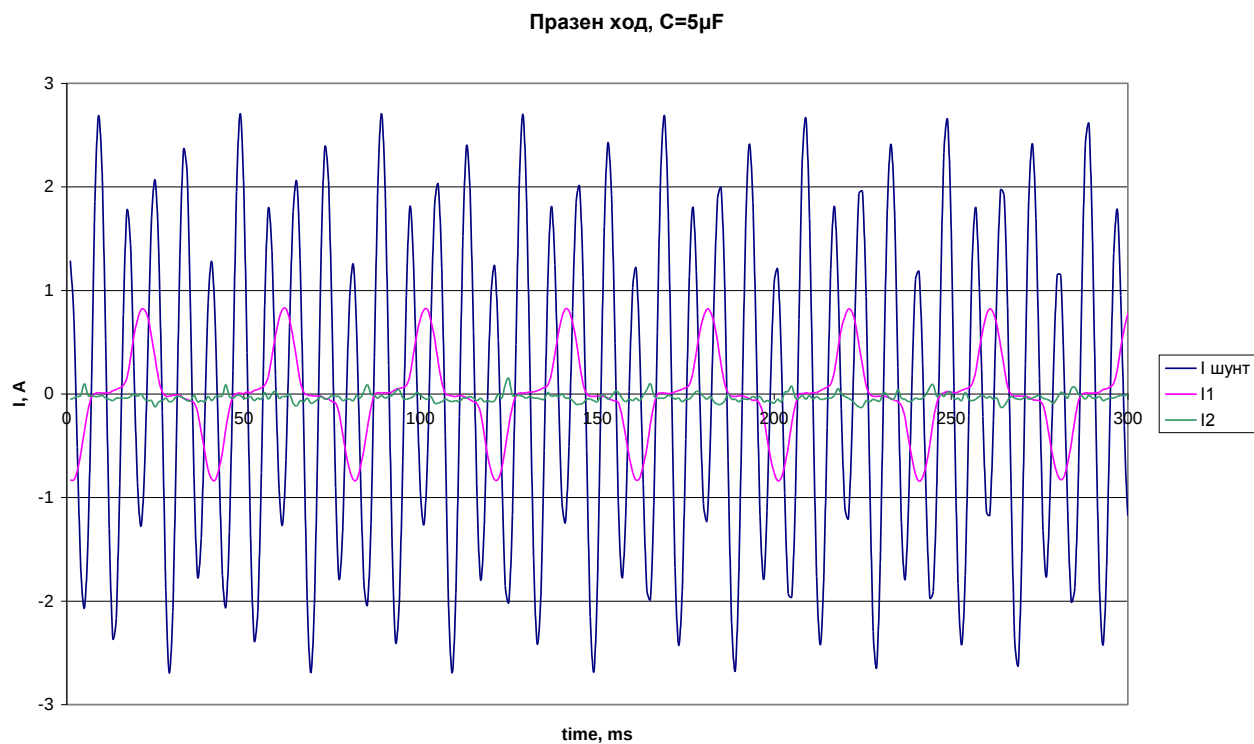
Записани са следните величини:

- U_2 -напрежение на вторичната намотка;
- $U_{ш}$ - напрежение на шунтовата намотка;
- I_1 - ток през вторичната намотка;
- $I_{ш}$ - ток през шунтовата намотка;

Графики от направените измервания, при включен кондензатор с капацитет $5\mu F$ са показани на фигурите от 4.10 до 4.19.Останалите измервания при кондензатори с капацитети $7\mu F$, $10\mu F$, $16\mu F$, $20\mu F$, $25\mu F$ и $30\mu F$ са дадени в Приложение 1.



Фиг. 4.10. Изменение на напрежението във вторичната и шунтовата намотки при празен ход



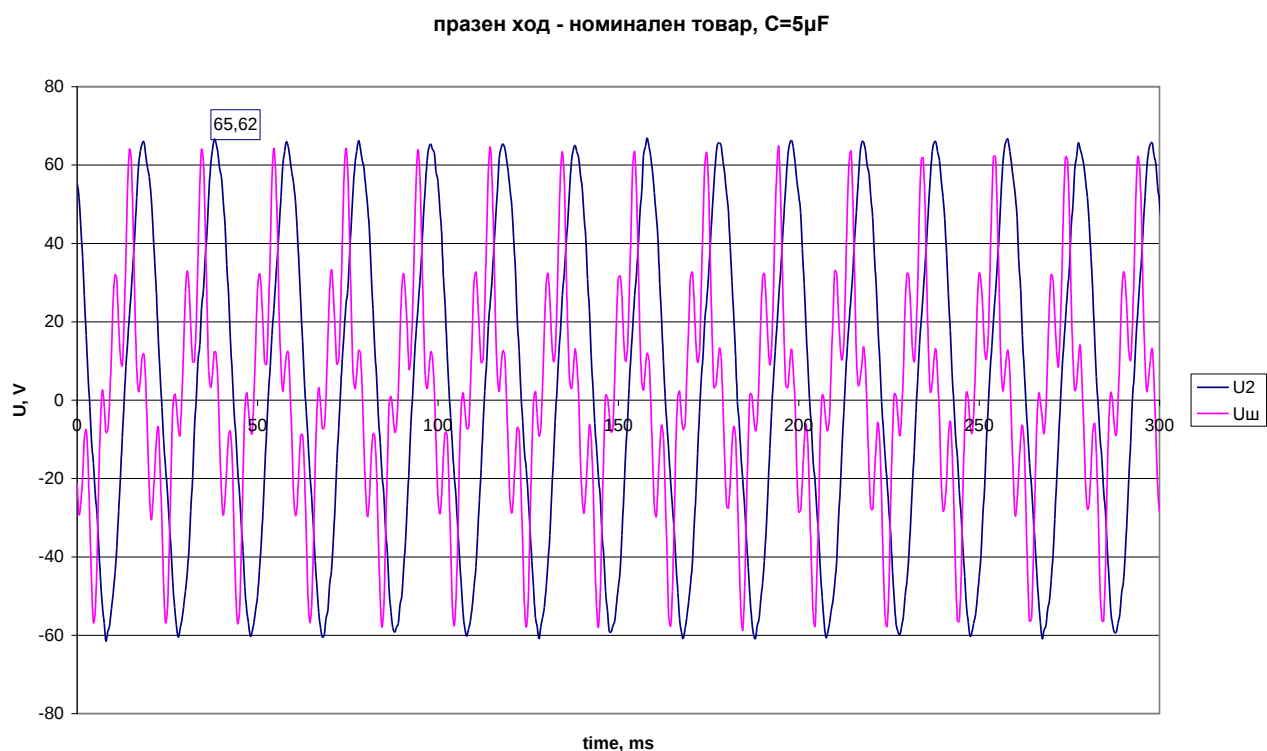
Фиг. 4.11. Изменение на тока в първичната, вторичната и шунтовата намотки при празен ход



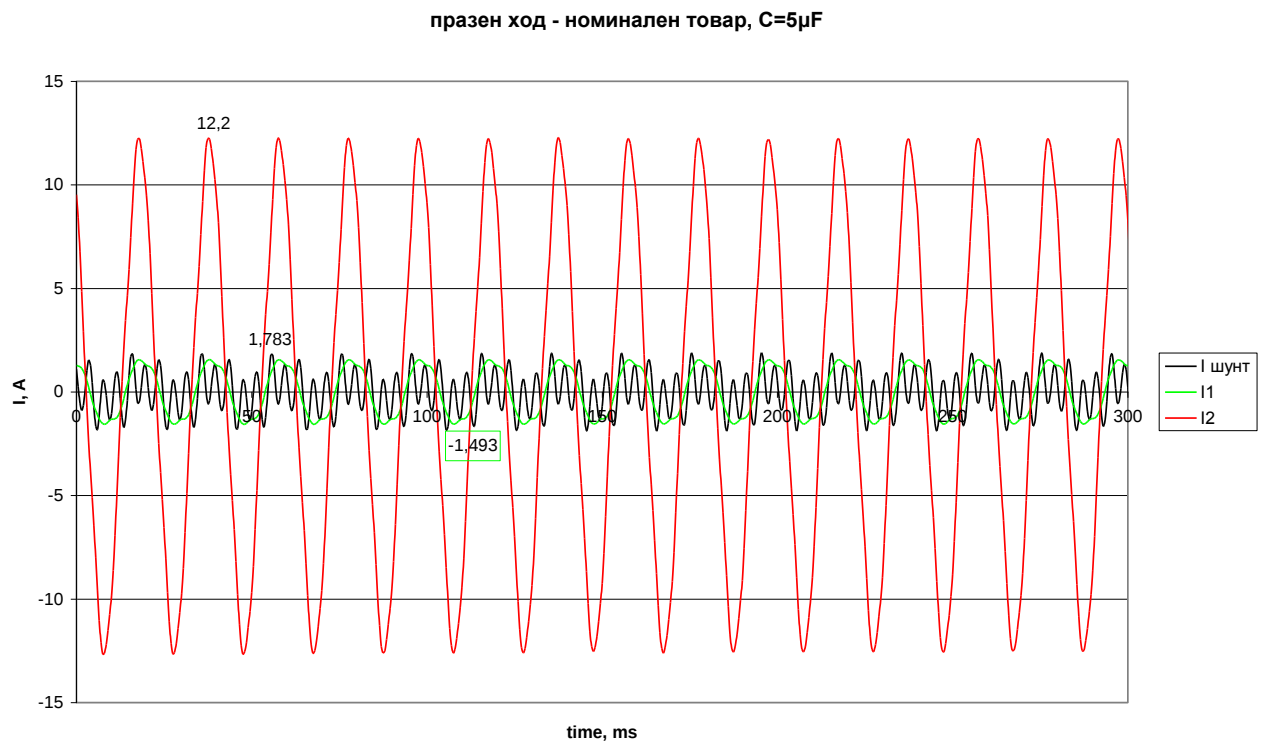
Фиг. 4.12. Изменение на напрежението в шунтовата намотка при ръчно преместване на шунта



Фиг. 4.13. Изменение на токовете в първичната и шунтовата намотки при ръчно преместване на шунта



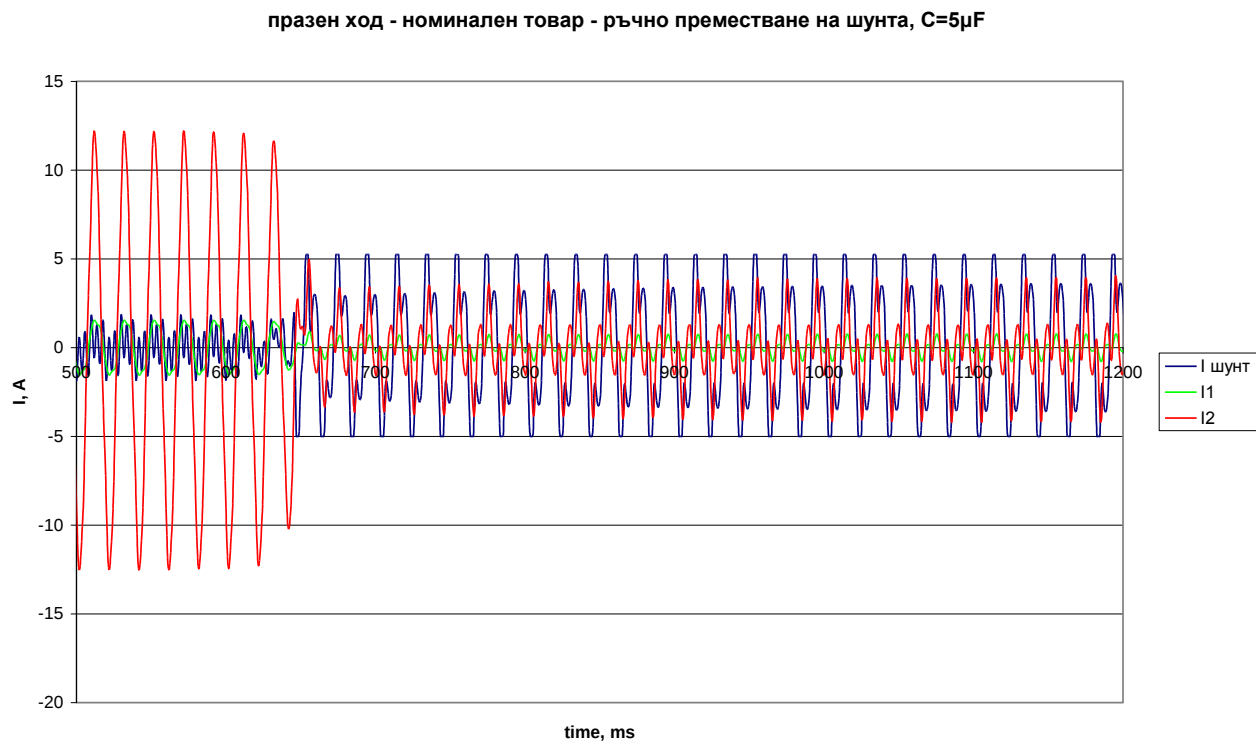
Фиг. 4.14. Изменение на напрежението във вторичната и шунтовата намотки при номинален товар



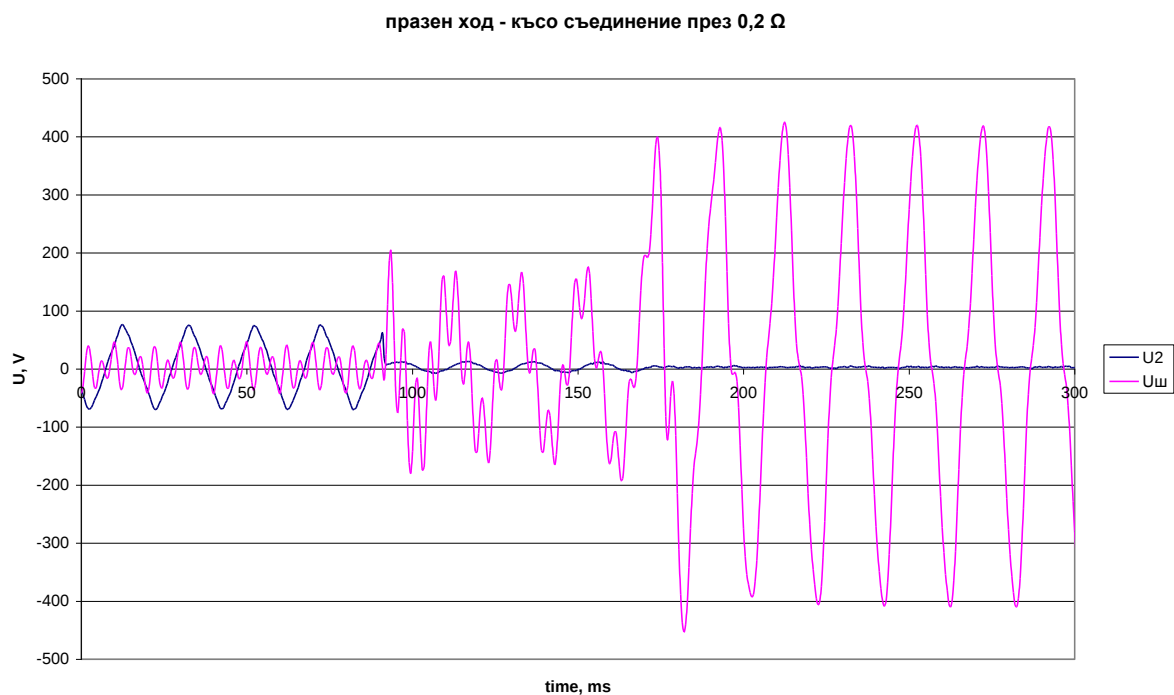
Фиг. 4.15. Изменение на токовете в първичната, вторичната и шунтовата намотки при номинален товар



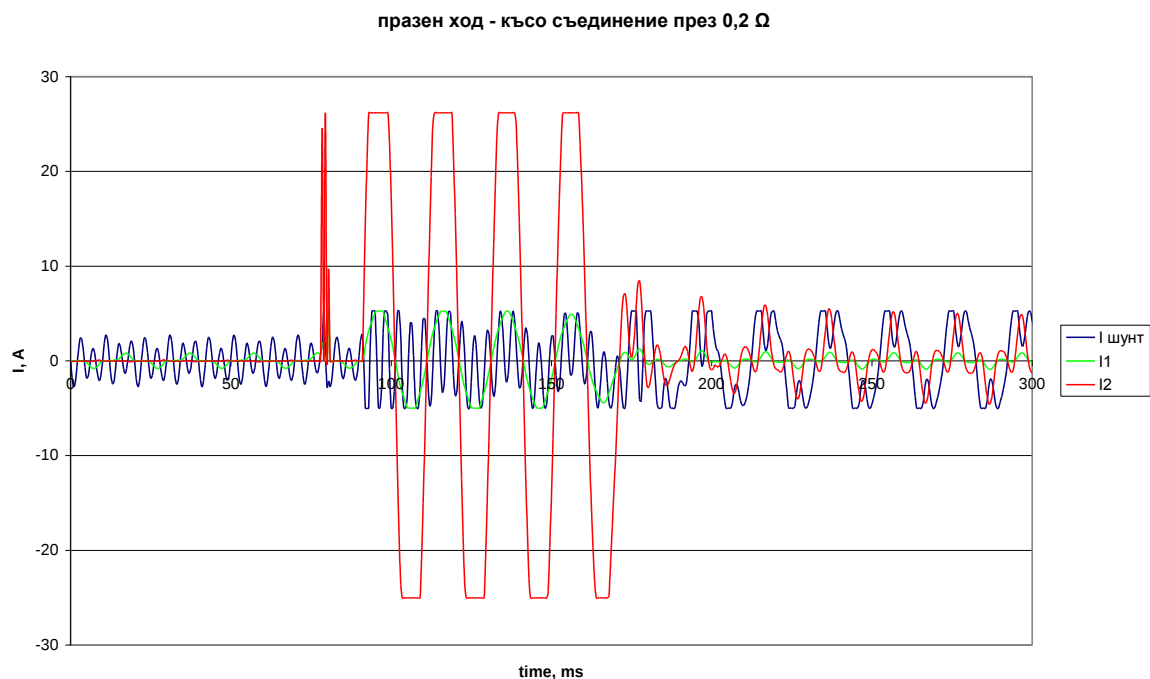
Фиг. 4.16. Изменение на напрежението във вторичната и шунтовата намотки при номинален товар и ръчно преместване на шунта



Фиг. 4.17. Изменение на токовете в първичната, вторичната и шунтовата намотки при номинален товар и ръчно преместване на шунта



Фиг. 4.18. Изменение на напрежението във вторичната и шунтовата намотки при празен ход и късо съединение във вторичната намотка през съпротивление $0,2 \Omega$



Фиг. 4.19. Изменение на токовете в намотките при празен ход и късо съединение във вторичната намотка през съпротивление 0,2 Ω .

IV.3. Изследване на висшите хармоници в тока и напрежението захранващото устройство

От експерименталните изследвания и направените записи във функция от времето за измененията на напреженията и токовете в опитния образец се вижда, че те съдържат хармоници. Проведени са лабораторни измервания за определяне на амплитудно-честотния спектър на съставните хармоници.

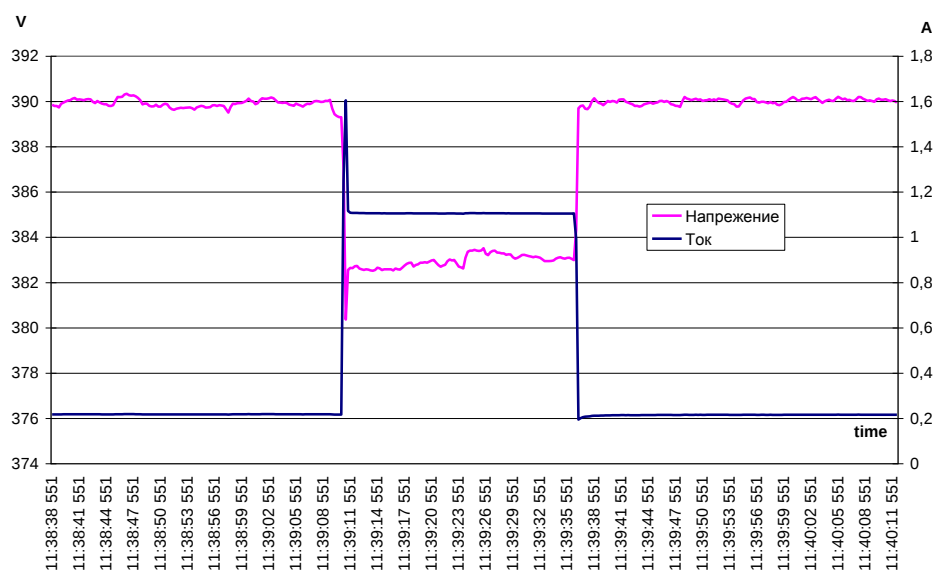
Измервания са направени при включени кондензатори във веригата на шунтовата намотка, с капацитет 30 μF и 5 μF . При всяко от измерванията са записани средните ефективни стойности на тока, напрежението, фазовия ъгъл между тях и спектъра на висшите хармоници до номер 50, за интервали от 0,25s. Измерванията са направени с помощта на два трифазни мрежови анализатора FLUKE 437 и FLUKE 435.

По нататък са дадени само измерените резултати при включен капацитет 5 μF , паралелно на шунтовата намотка. По отношение на амплитудно-честотния спектър на съставните хармоници и при капацитет 30 μF не се нарушават нормите на IEC.

IV.3.2. Включен капацитет 5 μF , паралелно на шунтовата намотка.

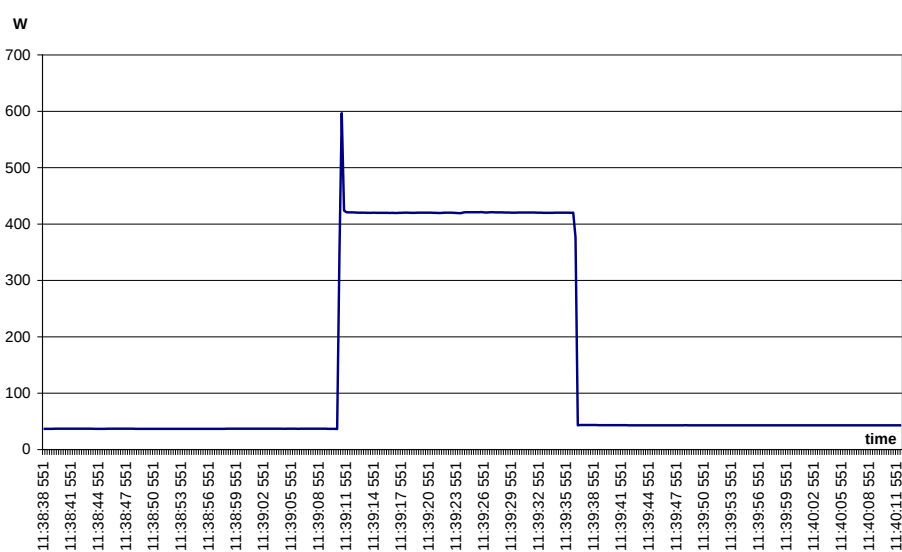
На фиг. 4.26 са показани токът и напрежението на страна 380V на трансформатора. Виждат се напрежението и тока на празен ход на трансформатора, момента на включване на номинален товар (11:39:11 h), както и момента на затваряне на шунта (11:39:36 h). При затварянето на шунта, токът и напрежението възстановяват стойностите си като тези при празен ход.

От фиг. 4.27 се вижда, че активната мощност на празен ход е 36,8 W, а при номинален товар е около 419,8 W. При затваряне на шунта, консумираната активна мощност е 43,0 W. Явно, че разликата от 6,2 W е за сметка на индуктираното е.д.н. в шунтовата намотка и протичащият ток в нея.

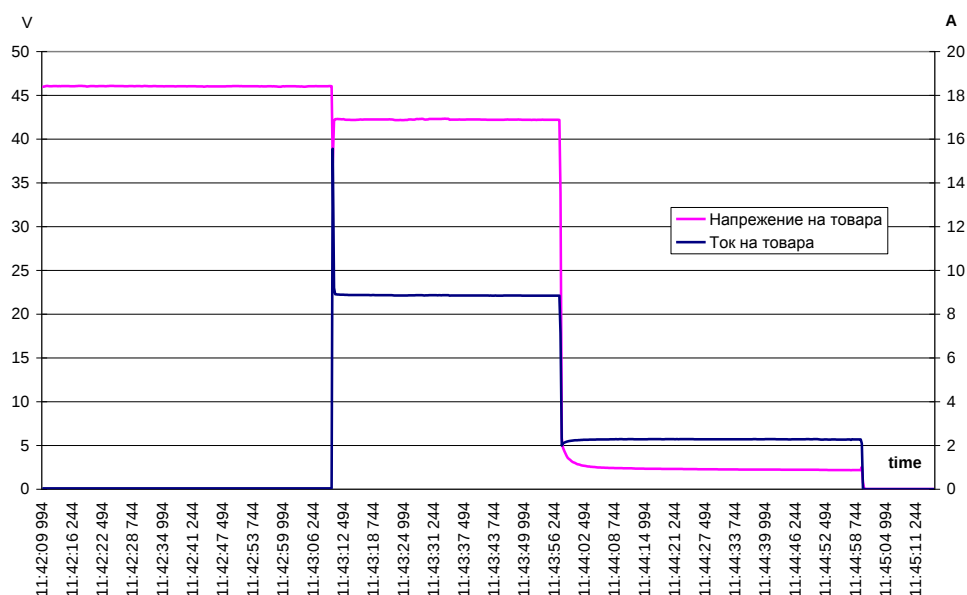


Фиг. 4.26 Ток и напрежение на първичната страна на трансформатора, при включен капацитет 5 μF , паралелно на шунтовата намотка.

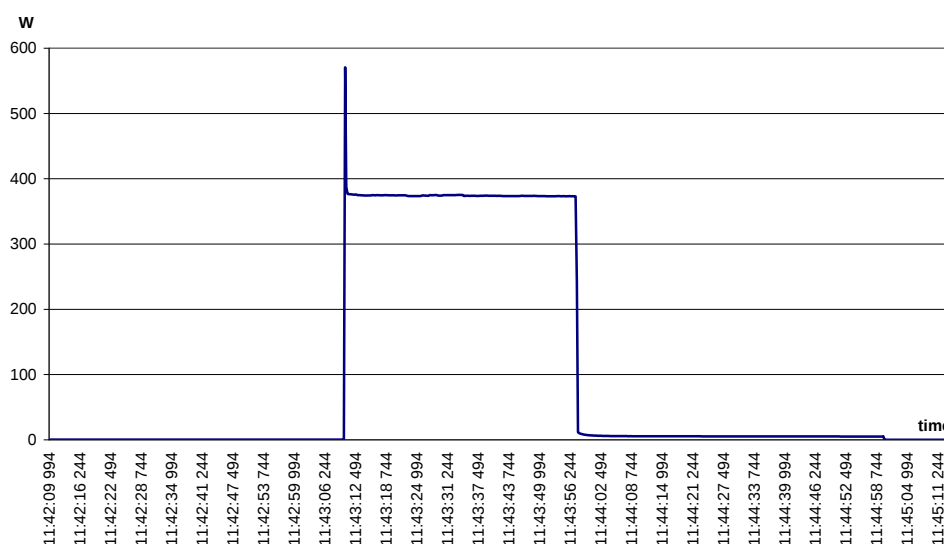
Тук се вижда действието на шунтовата намотка като ограничаваща токът в първичната страна на трансформатора. Това се потвърждава и от изменението на активната мощност, показано на фиг. 4.29. От фигурата може да се направи извода, че затварянето на шунта води до ограничаване на мощността в товара. На фиг. 4.28 е показано изменението на напрежението и тока във вторичната намотка на трансформатора при капацитет 5 μF , включен паралелно на шунтовата намотка. При затварянето на шунта, токът във вторичната намотка се ограничава до 2,28 A, а напрежението – до 2,17 V.



Фиг. 4.27. Изменение на първичната мощност на консуматора, при включен капацитет 5 μF , паралелно на шунтовата намотка.



Фиг. 4.28. Изменение на напрежението и тока във вторичната намотка на трансформатора, при включен кондензатор 5 μF , паралелно на шунтовата намотка.

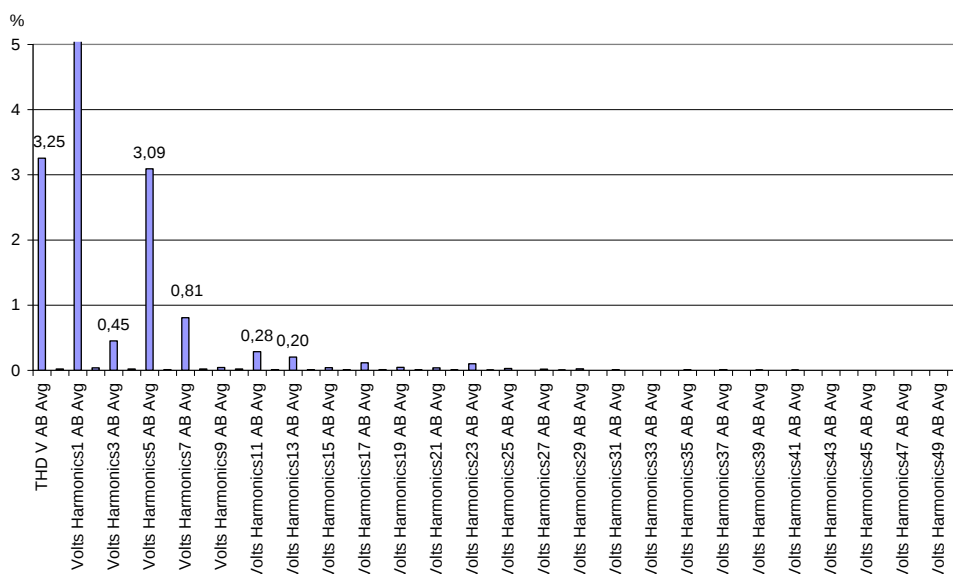


Фиг. 4.29. Изменение вторичната активна мощност в трансформатора, при включен кондензатор 5 μF , паралелно на шунтовата намотка.

Мощността, отдавана от вторичната намотка е показана на фиг. 4.29 Тя е 373,7 W, при номинален товар. Коефициентът на полезно действие на трансформатора в този режим е 0,89, т.е. загубите достигат до 11 %.

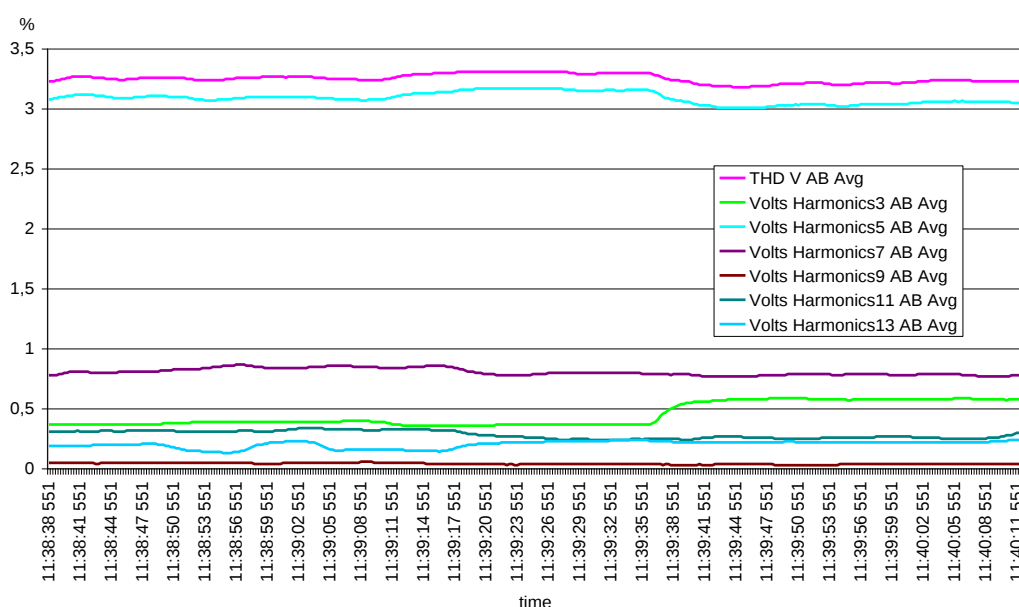
На фиг. 4.30 е показана хистограма на средните стойности на хармоничните съставлящи в напрежението до 50-ти ред. Стойностите на хармоничните съставлящи са подобни на случая, когато е включен кондензатор 30 μF . Преобладаващ е първи хармоник, но ординатната ос е мащабирана до 5% за да може ясно да се видят останалите хармонични съставлящи. Отново най-изразени 5-ти (3,09%), 7-ми (0,81%) и 3-ти (0,45%). По-слабо изразените хармоници 11-ти и 13-ти са със стойности съответно 0,28% и 0,20%. Останалите хармонични съставлящи са със стойности под 0,1%. Пълният

коэффициент на несинусоидалност (THD) е 3,25%. Всички стойности са под максимално допустимите от EN 50160:2010.

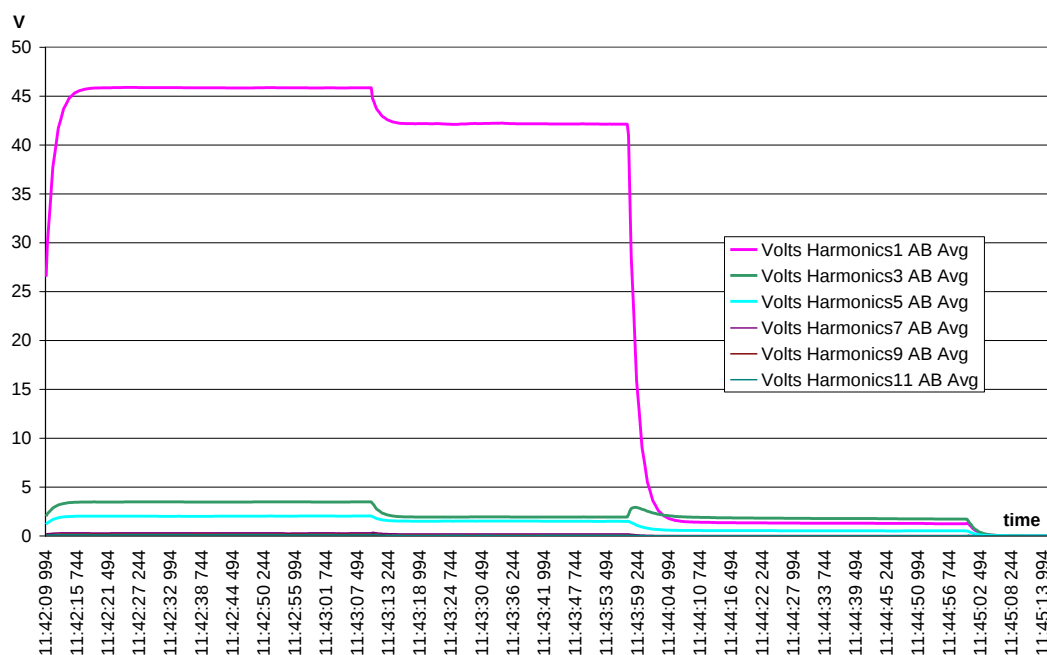


Фиг. 4.30. Хистограма на средните стойности в хармоничните съставящи на страна 380V, при включен капацитет 5 μ F, паралелно на шунтовата намотка.

На фиг. 4.31 е показан трендът на висшите хармоници в процент от основния на страна 380 V, при включен капацитет 5 μ F, паралелно на шунтовата намотка. Видно е, че захранващата мрежа не се замърсява с висши хармоници. Стойността на 5-ти хармоник не превишава 3,17 %, за 7-ми е регистрирана максимална стойност 0,87 %. Само при 5-ти хармоник се наблюдава увеличение на стойността му при включване на шунтовата намотка (от 0,37 % до 0,58 %). Общият коефициент на несинусоидалност (THD) не надхвърля 3,3 %. На фиг. 4.32 е показан трендът на абсолютните стойности на хармоничните съставящи във времето.



Фиг. 4.31. Тренд на хармоничните съставящи на страна 380V, при включен капацитет 5 μ F, паралелно на шунтовата намотка.



Фиг. 4.32. Тренд на абсолютните стойности на хармоничните съставлящи в напрежението на товара, при включен капацитет $5 \mu\text{F}$, паралелно на шунтовата намотка.

Изводи към четвърта глава

1. Доказва се, че значително подобряване на ефективността на токоограничението с магнитен шунт може да се осъществи, чрез поставяне на допълнителна намотка върху шунта, с паралелно свързан кондензатор.

2. Резултатите от изследването доказват, че оптималното решение от експериментиранияте капацитети е използването на кондензатор с капацитет $5 \mu\text{F}$, при което намаляването на напрежението и тока, в режим близък до късо съединение на изхода, е сравнително най-голямо.

Направеното теоретично изследване за повишаване на ефективността на захранващото устройство показва, че се подобряват техническите му параметри, чрез включване на изходящ кондензатор в шунтовата намотка. Това се потвърждава и от направените лабораторни изследвания.

3. За опитния образец в изследваните режими на работа загубите се движат от 5 % до 11 %.

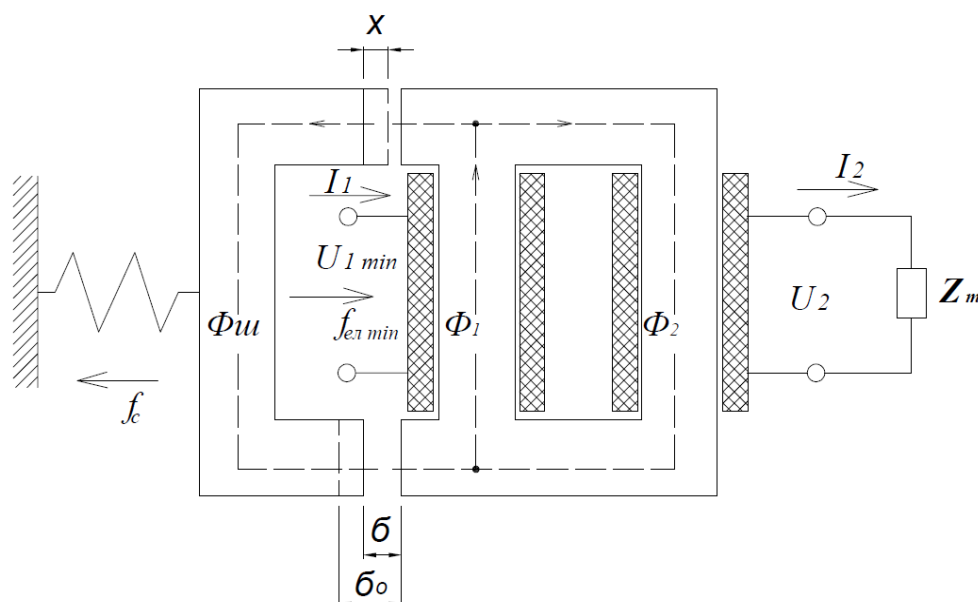
4. Изследването на амплитудно-честотния спектър на хармониците доказва, че най-изявени са 5 и 7 хармоници, но са регистрирани и нечетни хармоници с по-малко участие (3, 9, 11 и 13). Съществено е да се подчертае, че за изпитания образец генерираните хармоници деформират напрежението в границите на допустимия коефициент на несинусоидалност. $K_{\text{нес}} \text{ и } (\text{THD}) \leq 5\%$, което не нарушава изискванията на IEC.

V. АВТОМАТИЧНО СТАБИЛИЗИРАНЕ НА НАПРЕЖЕНИЕТО НА ИЗХОДА НА ТРАНСФОРМАТОР С ПОДВИЖЕН МАГНИТЕН ШУНТ

Предлага се и се изследва възможността за автоматично стабилизиране на изходящото напрежение на еднофазен трансформатор с подвижен магнитен шунт. Дължината на въздушната междина към основния магнитопровод се изменя под въздействието на две противоположни сили, електромагнитни на привличане и еластична създадена от пружина.

Такова устройство може да се приложи в случаите, при които използването на електроника повишава риска от авария, например при апаратура, която работи във взривоопасна среда.

Основа на анализа е електромагнитна система, разгледана в първа глава. Тази система, с опростен вид показана на фиг. 5.1, съдържа и пружинен елемент, който създава съпротивителна сила, противоположна на електромагнитната тягова сила привличаща шунта.



Фиг. 5.1

Нека U_{1min} е минималната ефективна стойност на първичното напрежение, за която стабилизаторът все още осигурява номинално напрежение на вторичната намотка U_{2H} . Тогава амплитудите на магнитните потоци, показани на фигурата са:

$$\Phi_2 = \Phi_{2ном}; \Phi_1 = \Phi_{1min}; \Phi_u = \Phi_{1min}$$

Следващите изчисления се правят с приближение, при което се допускат някои опростяващи предположения:

- Пренебрегват се потоците на разсейване и всички активни загуби в системата, както и магнитните съпротивления на феромагнитните магнитопроводи;

- Проводимостта на магнитния шунт се приема приблизително, че се определя от формулата, $\sigma_{\text{ш}} = \frac{\mu_0 S}{2\delta}$,

Където: $S = \text{const}$, е средно сечение на магнитния поток $\Phi_{\text{ш}}$ през въздушната междина, а δ - разстоянието между магнитопровода и шунта (за всеки конкретен случай).

Нека ефективната стойност на първичното напрежение U_1 получи някакво нарастване ΔU_1 . Това увеличава амплитудата на потока Φ_1 с $\Delta \Phi_1$. Съгласно направените опростяващи предположения $U_1 = w_1 \omega \Phi_1$, $U_1 + \Delta U_1 = w_1 \omega (\Phi_1 + \Delta \Phi_1)$, където w_1 е броят на навивките в първичната намотка. След изваждане поотделно на левите и десните страни на равенствата, се получава

$$\Delta U_1 = w_1 \omega \Delta \Phi_1, \text{ т.е. } \Delta \Phi_1 = \frac{\Delta U_1}{w_1 \omega}.$$

За да остане вторичният поток $\Phi_{2\text{ном}}$ непроменен е необходимо цялото нарастване на потока Φ_1 да се отклони през шунта, т.е. $\Delta \Phi_{\text{ш}} = \Delta \Phi_1$. Това може да стане само ако разстоянието δ се намали, т.е. магнитният шунт се привлече на известно разстояние x към магнитопровода. При това са в сила следните зависимости:

Преди нарастване на напрежението U_1 ,

$$f_{\text{ем min}} = k \Phi_{\text{ш min}}^2 = f_{\text{co}} = \kappa_{\text{пр}} (\delta_0 - \delta),$$

където: k - константа, която зависи от сечението на потока през въздушната междина; $f_{\text{ем min}}$ - средната стойност на силата на привличане при $x = \delta$ и $U_1 = U_{1\text{min}}$; f_{co} - силата, с която пружинката действа върху шунта, намиращ се на разстояние δ (когато $U_1 = U_{1\text{min}}$); $\kappa_{\text{пр}}$ - константа на пружината; δ_0 - разстояние между шунта и магнитопровода при $U_1 = 0$.

При нарастване на напрежението с ΔU_1 стойността на потока Φ_1 е,

$$\Phi_1 = \Phi_{1\text{min}} + \frac{\Delta U_1}{w_1 \omega}.$$

Това нарастване на потока трябва да премине изцяло през шунта, т.е.:

$$\Phi_{\text{ш}} = \Phi_{\text{ш min}} + \frac{\Delta U_1}{w_1 \omega} \quad (5.1)$$

За да се изпълни това условие е необходимо шунтът да се премести към магнитопровода на някакво разстояние x , така че общата въздушна междина по пътя на $\Phi_{\text{ш}}$ да стане $2\delta(x) = 2(\delta - x)$. Големината на това преместване x трябва да има стойност определена от равенството:

$$\Phi_{\text{ш min}} \left(\frac{U_{1\text{min}} - \Delta U_1}{U_{1\text{min}}} \frac{\frac{\mu_0 S}{2(\delta - x)}}{\frac{\mu_0 S}{2\delta}} - 1 \right) = \frac{\Delta U_1}{w_1 \omega} \quad (5.4)$$

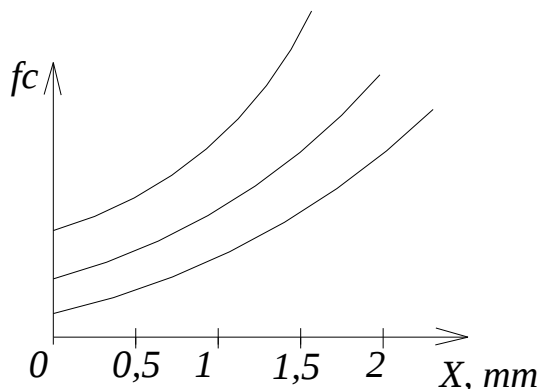
$$x = \delta \left[1 - \frac{\Phi_{u \min} \left(1 + \frac{\Delta U_1}{U_{1 \min}} \right)}{\Phi_{u \min} + \frac{\Delta U_1}{W_1 \omega}} \right] \quad (5.5)$$

Преместването x , определено по горната формула създава през шунта необходимия поток, $\Phi_{u \min} + \frac{\Delta U_1}{W_1 \omega}$.

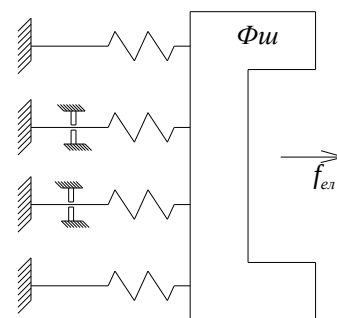
За да бъде шунта в равновесие е необходимо създадената от пружината противодействаща сила да е равна и противоположна на електромагнитната.

$$f_c = k \left(\Phi_{u \min} + \frac{\Delta U_1}{W_1 \omega} \right)^2 = \kappa_{np} (\delta_0 - \delta + x) \quad (5.6)$$

На фиг. 5.2 са показани криви на тази зависимост за конкретни стойности на ΔU_1 .



Фиг. 5.2.



Фиг. 5.3.

Подобни нелинейни зависимости не може да се реализират с една еластична връзка, която създава линейна зависимост. На фиг. 5.3 е показана възможност за апроксимиране на необходимата крива с реална, представляваща два линейни участъка с различен наклон.

По този начин може да се постигне приблизително стабилизиране, което да осигури работата на консуматора в рамките на стандартните $\pm 5\%$ /за освет. уредби $\pm 2\%$ /, при значително по-големи отклонения на захранващото напрежение.

Идеята на показаната възможност е при малки стойности на x , съпротивителната сила да се създава от две паралелно свързани пружини, а при нарастване на x съпротивителната сила да се създава от четири пружини, като по този начин се гарантира равномерно и симетрично преместване на шунта.

В заключение може да се каже, че поддържането на напрежението в допустими граници ще подобри работата на електрическите консуматори (електрически двигатели, осветителни тела и уредби, системи за сигнализация и автоматика и др.) и ще запази ефективността на защитите им от претоварване и къси съединения.

Изводи към глава пета

1. Доказана е възможността, за автоматично стабилизиране на напрежението на трансформатор с помощта на подвижен магнитен шунт, чрез използване на еластична връзка.
2. Предложен е вариант за реализирането на еластичната връзка, с използване на четири пружини, сдвоени с различни параметри, с които се повишава точността на стабилизацията вследствие симетричното придвижване на шунта.
3. Недостатъкът на еластичната система се компенсира от безконтактното регулиране /стабилизиране/ на напрежението, което позволява лесно преодоляване на проблемите на безопасността при работа във взривоопасна среда.

Заклучение

С теоретичните и експериментални изследвания са доказани нови възможности за приложение на магнитните шунтове, с подчертана ефективност в захранващи устройства с малка мощност и ниско напрежение за работа във взривоопасна среда, включително и в рудници опасни по газ и прах.

Основните приноси за науката и практиката съдържащи се в дисертационният труд са следните:;

Научни приноси

С научен принос се характеризират предложените оригинални идеи за нови приложения на магнитните шунтове:

- за регулируемо включване и изключване на електрически товари ;
- за автоматично регулиране и стабилизиране на напрежението;
- осъществяване на максималнотокова защита от ненормални режими на работа, включително от къси съединения, чрез ограничаване на напрежението и тока по безконтактен начин.

Научно-приложни приноси

Към тази категория постижения следва да се отнесат:

- теоретичните изследвания и изведените зависимости за основните параметри характеризиращи работата на захранващи устройства с магнитен шунт;
- експерименталните изследвания и анализите на получените резултати, потвърждаващи теоретично защитените идеи за новото приложение на магнитните шунтове за регулиране и стабилизиране на напрежението на захранващи устройства и за защита от претоварване на изходящите вериги, чрез

безконтактно ограничаване на напрежението и тока, а не с изключване чрез комутационно прекъсване;

- изследванията за повишаване на ефективността на магнитните шунтове чрез въвеждане на допълнителна намотка и кондензатор;

- Експериментите за амплитудно-честотния спектър на хармониците и доказателството, че коефициента на несинусоидалност (THD) на напрежението, не надхвърля допустимите стойности от 5%, при апаратите с магнитен шунт.

Приложни приноси

Приложни приноси в дисертацията са разработените, изработени и изпитани образци на основния елемент в еднофазните захранващи устройства ниско напрежение, с което се доказва, тяхната осъществимост.

Приложен принос представляват адаптациите на методите за лабораторни измервания на статичните и динамичните параметри на изпитваните образци.

Постиженията в дисертационния труд могат и трябва да намерят по-нататъшно свое развитие и приложимост в практиката:

- оптимизация на конструктивните параметри – брой навивки, капацитет към допълнителната намотка на магнитния шунт;
- създаване на различни времезависими характеристики на максималнотоковата защита в зависимост от вида и предназначението на товара;
- разработване конструкция и ред от захранващи устройства с магнитен шунт за еднофазно захранване, за напрежение до 1000 V;
- адаптиране на постиженията към трифазни захранващи устройства с магнитен шунт.

Публикации по дисертационния труд

1. Козаров А., Т.Върбев, Една възможност за подобряване на електрозахранването на осветителния товар в подземните рудници, Минно дело и геология, бр.8, 2004г.
2. Върбев Т.А., Възможност за използване на трансформатор с магнитен шунт като максималнотокова защита, Год. МГУ "Св.Ив.Рилски", том 51, св.ІІІ, стр.117-119, 2008.
3. Козаров А., Т.Върбев, Възможности за автоматично стабилизиране на напрежението на изхода на трансформатор с магнитен шунт, Год.МГУ "Св.Ив.Рилски", том 53, св.ІІІ, стр.97-99. 2010
4. Върбев Т.А., А. Козаров, Възможност за повишаване на ефективността на магнитния шунт. Год. МГУ "Св.Ив.Рилски", том 55, св.ІІІ, стр. 67-69, 2012.