

МИННО-ГЕОЛОЖКИ УНИВЕРСИТЕТ “СВ.ИВАН РИЛСКИ”

инж. Ромео Фердинандов Александров

**ИЗСЛЕДВАНЕ И ОПТИМИЗИРАНЕ НА
ЕЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИТЕ ПАРАМЕТРИ НА СИСТЕМА
ЗА МАГНИТНА СЕПАРАЦИЯ**

**АВТОРЕФЕРАТ
НА
ДИСЕРТАЦИЯ**

ЗА ПОЛУЧАВАНЕ НА ОБРАЗОВАТЕЛНА И НАУЧНА СТЕПЕН “ДОКТОР”

НАУЧНА СПЕЦИАЛНОСТ
02.04.15 Електроснабдяване и електрообзавеждане

Научен консултант проф. д-р Константин Б. Тричков

София 2012 г.

Дисертационният труд е обсъден и насочен за защита от разширен катедрен съвет на катедра “Електротехника” при Минно-геоложкия университет “Св. Иван Рилски” – София.

Дисертационният труд е изложен на 131 страници обяснителна записка. Списъкът на използваната литература съдържа 103 заглавия. Основните резултати от дисертационния труд са отпечатани в 3 публикации.

Номерацията на главите, фигурите и таблиците в автореферата съответстват на тези от дисертацията.

Защитата на дисертационния труд ще се състои на от в Минно-геоложки университет “Св. Иван Рилски”, зала на заседание на научно жури избрано на заседание на ФС на МЕМФ

Материалите по дисертацията са на разположение на интересуващите се в сектор “Следдипломна квалификация”, стая № 5 етаж 2.

Адрес: 1700 София, Студентски град
МГУ “Св. Иван Рилски”

Автор: Ромео Фердинандов Александров

Заглавие: Изследване и оптимизиране на електротехническите параметри на система за магнитна сепарация

Тираж: 25

Печат: Издателска къща „Св. Иван Рилски” – София

УВОД

Желязната руда е градивен елемент на индустриализираните икономики в света. Като основна суровина за производство на стомана, желязната руда е в основата на всички аспекти на човешката дейност, инфраструктура и стандарт на живот. В действителност, желязната руда е неразделна част от глобалната икономика, повече от всяка друга суровина, освен може би само от петрола.

Напоследък се наблюдава нарастване на интереса към отпадъка при преработката на желязна руда, включително и натрупвания в продължение на десетилетия в хвостохранилищата, а възможностите за ефективна преработка на този отпадък го превръщат в цена суровина. Положителните ефекти от преработката на тази суровина са разнопосочни – икономически, социален, екологичен и др. В България се очаква хвостохранилището на "Кремиковци" да е източник на такава суровина за производство на пелети и барит.

Независимо каква е суровината, желязна руда добита от земните недра в рудниците или отпадък от минало или настоящо промишлено производство, тя се подлага на преработка за придобиване на определени качествени и количествени показатели. Важен технологичен процес в етапите на преработка е магнитната сепарация. Физическата същност на магнитната сепарация се състои в това, че магнитното поле променя траекторията на движение на минералните частици имащи магнитни свойства, което предизвиква отделянето им от потока на други материали, които нямат такива свойства.

Интензифицирането на технологичните процеси за магнитно разделяне, може да се реши на базата на импулсни или бягащи магнитни полета. Подходящ начин за създаване на магнитни полета с различна конфигурация – импулсни, бягащи или комбинирани с висока степен на управляемост е използването на силов електронен преобразувател за хранване електромагнитната система, обвързани със система за управление.

За определяне на въздействията върху обработвания материал при процеса магнитна сепарация е необходимо да се познаят електротехническите аспекти на процесите и техните основни закономерности. Изследванията на тези процеси се оказват необходими, защото по отношение на тях, теорията и опитът натрупани при развитието на конвенционалните електромеханични и електронни преобразуватели се оказва недостатъчен.

За решаване на част от комплексния научен проблем за повишаване на ефективността и интензификацията на магнитните методи за обогатяване, се формулира **ЦЕЛТА НА НАУЧНОТО ИЗСЛЕДВАНЕ В ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД.**

Целта на дисертационния труд е да се определят функционалните зависимости на електротехническите параметри на система за магнитна сепарация в съответствие с технологичните особености. Въз основа на така установените зависимости да се разработи управляващо устройство за създаване на ефективни импулсни магнитни полета за магнитен сепаратор.

I. ОБЩИ СВЕДЕНИЯ, ПОСТИЖЕНИЯ И ПЕРСПЕКТИВИ В ЕЛЕКТРОМАГНИТНОТО СЕПАРИРАНЕ

1.1. Общи сведения за процеса магнитна сепарация с импулсни магнитни полета

Освен магнитните сили, на частиците действат и комплекс други сили – силата на тежестта, инерционни сили, сила на реакцията породена от съпротивлението на средата, адхезионни сили и други. Възникващите сили могат да се подразделят на активни, пасивни и дисипативни. За магнитните частици с по-силни магнитни свойства, които се отделят от останалия материал, магнитната сила е активна, а пасивни са силата на тежестта, инерционните сили, силата на реакцията. За немагнитните частици, активна е силата на тежестта, а останалите - пасивни. Дисипативните сили са свързани с загуба на енергия и намаляват активните и пасивните сили.

За да се разделят смес от минерали с различаващи се магнитни свойства, трябва да са изпълнени следните условия:

- Магнитната сила F'_{magn} възникваща в силномагнитните минерали трябва да бъде равна или по-голяма от равнодействащата на всички механични сили F'_{meh} действащи на тези минерали в направление противоположно на магнитната сила. $F'_{magn} \geq F'_{meh}$;

- Магнитната сила F''_{magn} възникваща в слабномагнитните минерали трябва да бъде по-малка от равнодействащата на всички механични сили F''_{meh} действащи на тези минерали. $F''_{magn} < F''_{meh}$.

Освен това $F'_{magn} > F''_{magn}$.

От изложеното по-горе може да се каже, че за разделяне на магнитна фракция от друга, трябва да има противоположни сили, като активните трябва да са по-големи от пасивните сили.

1.1.1 Флокуляция на силномагнитни минерални частици в магнитно поле.

Дребните и фино смлени частици на силномагнитните минерали, като попаднат в работната зона на сепаратора, под влиянието на магнитното поле се намагнитват и образуват удължени агрегати, които се наричат магнитни флокули, които поради удължената си форма, притежават магнитни свойства, различаващи се от тези на отделните минерални зърна.

При магнитната сепарация флокуляцията се извършва в условията на нееднородни магнитни полета, създавани от магнитните системи на сепараторите.

Обикновено флокуляцията подобрява извличането на магнитните минерални частици в концентрата и влошава качеството на концентрата.

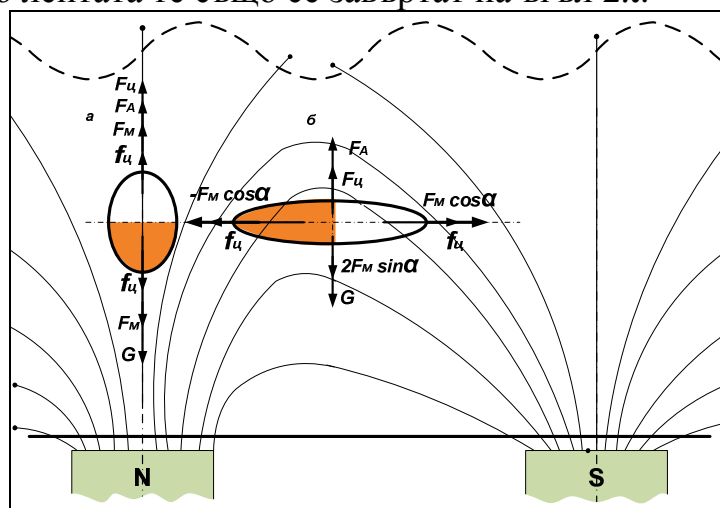
1.1.2 Пулсиращо магнитно поле.

В променливо магнитно поле магнитните частици, периодически се пренамагнитват и се ориентират, следвайки характера на полето. Когато интензитетът на магнитното поле е значително по-голям от стойността на коерцитивната сила на силно магнитните частици $H \gg H_C$, последните се привличат към полюсите на магнитната система и образуват агрегати, както в постоянно магнитно поле, с тази разлика, че частиците вибрират. Образува се “кипящ слой” от магнитна фракция. Зависимостта на интензивността на кипене от честотата на полето се определя по опитен път. Оптималната честота се движи от 15 до 20 Hz. Получените вибрации на частичките предават кинетична енергия на полепналите скални частици и увеличават големината на действащите върху тях механични сили F''_{meh} , без да се увеличава стойността на F'_{meh} .

1.1.3 Бягащо магнитно поле.

Освен по механичен път, бягащо магнитно поле може да се създаде и от редуващи се електрически импулси подадени към отделните електромагнити, от подходящо управляващо устройство. Магнитната система се състои от значителен брой полюси с редуваща се полярност, отстоящи на определено разстояние един от друг.

Ъгълът на интензитета на полето спрямо оста x, γ се изменя от 0 до 2π , когато една частица изминава път, равен на двойната стъпка между полюсите, поради което магнитното поле се нарича още въртящо се. При движение на частиците спрямо лентата те също се завъртат на ъгъл 2π .



фиг. 1.1.3

При достатъчно голяма честота на въртене върху флокулите действат комплекс от сили, те се разрушават и прегрупират (фиг. 1.1.3). Кое то предизвиква освобождаване на захванатите в тях немагнитни частици.

Този тип магнитно поле е намерило значително приложение при конструирането на електромагнитни сепаратори.

1.1.4 Класификация на магнитните сепаратори

Според технологичните особености, магнитни методи се класифицират в три групи – основни, спомагателни и подготвителни. Основните се подразделят на комбинирани методи и методи за пряко отделяне.

Основните признаци, по които се осъществява класификацията на магнитните сепаратори са свързани с принципа на работа и устройството им.

1.2 Технологичен потенциал на магнитната и електрическата сепарация

Магнитните, електрическите и комбинираните методи на минералното обогатяване имат значителни икономическо-екологични предимства в тези области, където те могат да се прилагат технологично. Потенциалът им се основа на оценката на нивото на различните типове електромагнитни сили и тяхната роля в силовите режими на минералната сепарация. Във връзка с това са публикации.

Новите процеси на обогатяването използват не само електромагнитните свойства на минералите, но също така и други техни физични или физико-химични свойства. Това са, например, плътност, размер и форма на частиците, повърхностните свойства и т.н. Обикновено, тези нови процеси включват високо градиентна магнитна сепарация, отделяне чрез магнитна адхезия, полиградиентно разделяне, феро-хидростатично, магнито-хидростатично и електродинамично разделяне, разделяне с магнитни носители, флотация в магнитни полета, разделяне в магнитна суспензия, динамична и термо-магнитна сепарация, магнитна концентрация върху наклонени равнини и други процеси. Техническата възможност за магнитна сепарация на йони също изглежда обещаващо.

Високо-градиентното магнитно сепариране с използване на свръхпроводящи магнитни системи позволява да се извлекат слабо магнитни минерални комплекси с размер на частиците $\approx 1\mu\text{m}$. От друга страна, такова разделяне не е възможно, дори да се използват сходни или дори по-силни свръх проводящи системи с отворена магнитна система (т.е. ниско градиентни без феромагнитна матрица). Предимства на свръх проводящите магнитни системи са в комбинираните процеси на магнитно хидродинамично сепариране, където извличащата сила е пропорционална на плътността на тока и магнитната индукция в работното пространство. По този начин с увеличаване на магнитната индукция, в резултат на свръхпроводяща система, токовата плътност може да бъде намалена.

В момента, от особено значение е високо градиентната сепарация в силни магнитни полета. По същество, тя е магнитно-хидромеханичен процес, в който голяма част от работното пространство се контролира с хидромеханични сили. Намалването на работната зона, или локализация на силите в околностите на работните повърхности, като са изпълнени определени условия, води до рязко увеличаване на пондеромоторната сила.

Комбинацията на режими с високо интензивно поле (компактност, висока производителност и ефективност на магнитните сепаратори) и екологично чистият процес, правят магнитните, електрическите и комбинираните технологии предпочитани особено за подземно обогатяване, за мобилни и модулни станции, а също така и за суха сепарация. Сухата сепарация има голяма перспектива поради намаляване енергоемкостта на технологичния процес и за предприятия със затруднен достъп до технологична вода.

В световен мащаб, към едно от направленията за интензифициране на технологични процеси, свързани с обработка на вещества, следва да бъдат отнесени създадените перспективни технологии за сепариране на магнитни и немагнитни компоненти на твърди прахообразни вещества с помощта на хармонично бягащо магнитно поле. Такова поле се създава от линейни индуктори, захранени от трифазно променливо напрежение, които по идея съответстват на линейните асинхронни двигатели.

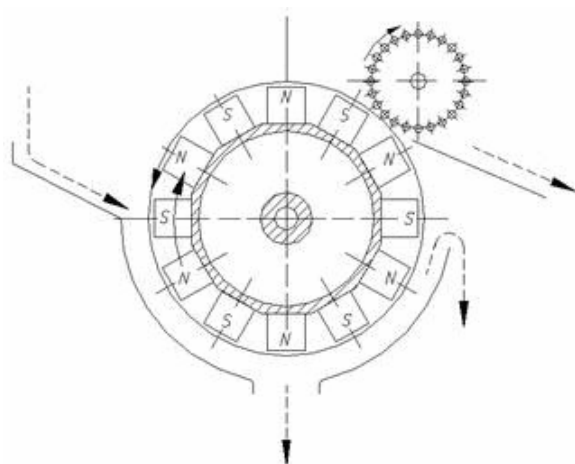
Перспективна посока за развитие са електромагнитните сепаратори без движещи се активни работни части. Движението на материала в работната зона, което се извършва на базата на силите, породени от кинетичната и потенциалната енергия на обработваната суспензия и на импулсните магнитни сили на електромагнитната система.

1.3. Принцип на работа и примерни конструкции на магнитни сепаратори с импулсни и бягащи магнитни полета

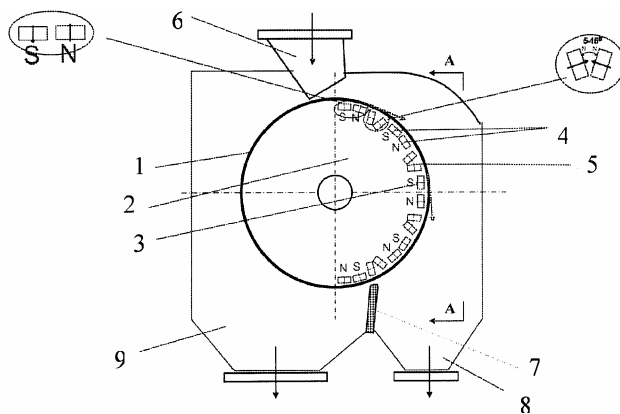
1.3.1. Магнитни системи с бягащо магнитно поле създадено по механичен път

Един от начините за създаване на бягащо магнитно поле по механичен път е преместването на лента или барабан спрямо многополюсна магнитна система с редуваща се полярност.

Сепаратори от такъв тип са показани на фиг. 1.3.3 и фиг. 1.3.4.



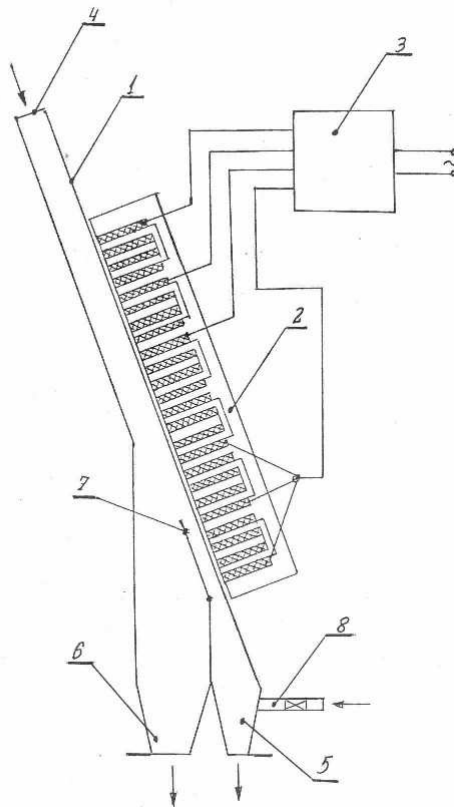
фиг. 1.3.3



фиг. 1.3.4

1.3.2 Постижения при работата по сепараторите с импулсно и бягащо магнитно поле за електромагнитна сепарация

Електромагнитният сепаратор показан на фиг. 1.3.5 служи за мокро обогатяване на силно магнитни руди, за регенерация на феромагнитни суспензии и др.



фиг. 1.3.5

Електромагнитният сепаратор показан на фиг. 1.3.5 се присъединява към електрическото захранване чрез устройство (3). В набора от електромагнити (2) се създава импулсно магнитно поле, което отклонява силно магнитни частици към стената на ваната (1), която е откъм страната на електромагнитната система. Тези частици преминават от горната страна на подвижния отсекател (7) и се насочват към отвора за разтоварване на магнитната фракция. Немагнитните частици преминават под подвижния отсекател, и се насочват към отвора за разтоварване на не магнитната фракция. Ваната е изработена от немагнитен материал, за да не оказва екраниращ ефект. Феромагнитната суспензия постъпва през захранващ отвор (4) и се обработва в обема на ваната. Магнитната фракция преминава през кутията (5) и през регулируем отвор се разтоварва, а през кутия (6) с регулируем отвор се разтоварва немагнитната фракция. Щуцерът (8) служи за подаване на промивна вода (1).

В настоящия дисертационен труд вниманието е концентрирано именно към такъв тип електромагнитни сепаратори.

1.4 Методи и техника за създаване на силови импулсни и бягащи магнитни полета

1.4.1 Принцип на работа и регулиране на импулсните преобразователи.

Импулсните преобразователи на постоянно напрежение (ИППН), са електронни преобразователни устройства, които преобразуват постоянно входно напрежение в постоянно напрежение на изхода с друга средна стойност. Напрежението на изхода при тях се регулира посредством времената за включване и изключване на електронен ключ.

От допускане, че ключът е идеален, т.е. съпротивление във включено (отпушено) състояние $R_F \rightarrow 0$ и съпротивление в изключено (запушено) състояние $R_R \rightarrow \infty$, следва че при затворен ключ напрежението върху товара е равно на входното, а при отворен ключ напрежението върху товара е нула. Тогава средната стойност на напрежението върху товара (изходното напрежение) ще зависи от продължителността на двете състояния на ключа и може да се регулира чрез тяхната промяна. В практиката са разпространени два основни метода на регулиране на ИППН:

- Широчинно-Импулсна Модуляция (ШИМ). Регулирането се извършва при постоянен период (T), чрез промяна на ширината на импулса (t_{on}).

- Честотно-Импулсна Модуляция (ЧИМ) или още се нарича Време-Импулсна Модуляция (ВИМ). Регулирането се извършва чрез промяна на работната честота (f), респективно периодът (T), но постоянна продължителност на времето t_{on} .

Ако се разгледат правоъгълни импулси с минимална стойност y_{min} , максимална стойност y_{max} и коефициент на запълване $D = \frac{t_{on}}{T}$,

y_{max} за ($0 < t < DT$) и y_{min} за ($DT < t < T$). Тогава:

$$y = \frac{1}{T} \left(\int_0^{DT} y_{max} dt + \int_{DT}^T y_{min} dt \right) = \frac{DTy_{max} + (1-D)Ty_{min}}{T} \quad (1.20)$$

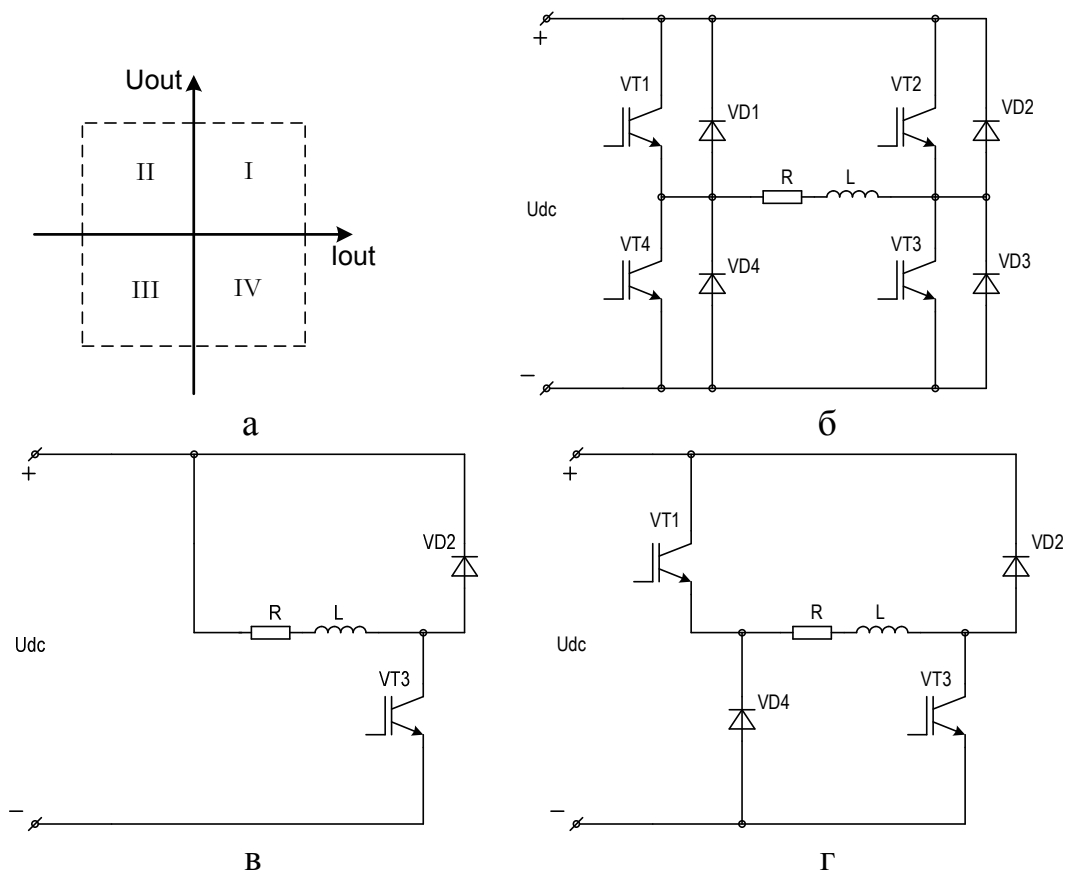
$$y = Dy_{max} + (1-D)y_{min}$$

Израз 1.20 в много случаи може да бъде опростен, при $y_{min}=0$, като $y = Dy_{max}$.

Най-простия начин за генериране на ШИМ-сигнал е методът на пресичането при три вида подравняване симетрично и асиметрично ляво и дясно.

Разглеждат се три типа преобразователи, два от които са подмножество на една схема. Това е схемата на мостов импулсен (четири квадрантен) преобразовател показан на фиг. 1.4.2б. Всеки преобразовател може да бъде категоризиран в зависимост от това в кой квадрант е възможна неговата работа т.е. от поляритета на тока и напрежението на товара (фиг. 1.4.2а).

Трите различни преобразователя на фиг. 1.4.2 са класифицирани в зависимост от техните изходни ток и напрежение (I_o, V_o).



фиг. 1.4.2

Четириквандрантният преобразувател от фиг. 1.4.2б се състои от четири транзистора и противоположно свързани четири диода. Той комбинира в себе си останалите схеми. При него работят и четирите електронни ключа и е възможно подаване на положително или отрицателно напрежение на товара и протичане на ток през товара в двете посоки.

Ако от мостовата схема се запазят транзистора VT3 и диода VD2, а се шунтират VT1 VD1 и се премахнат VT2 VT4 и VD4 се получава схемата показана на фиг. 1.4.2в. Тя може да пропуска ток през товара само в положителна посока. Диодът VD2 служи за затваряне токовете на самоиндукция, когато през активно-индуктивния товар е текъл тока, а транзисторът VT3 се запущи. Той не позволява появата на отрицателно изходно напрежение. Този преобразувател може да пропуска ток само от захранването към товара през еднопосочния ключ VT3. Поради тази причина, преобразувателят може да работи само в първи квадрант ($+I_o, +V_o$) и се класифицира като едноквандрантен.

Преобразувателят от фиг. 1.4.2г е двуквандрантен ($+I_o, \pm V_o$), той работи в I-ви квадрант когато са отпушени VT1 VT3, но работната му точка може да се премине и в IV-ти квадрант, когато транзисторите се запущат, се отпушват диодите. По време на работата в IV-ти квадрант, запасената енергия в индуктивния елемент на товара се регенерира в захранването, тока протича през диодите VD2 и VD4, като си запазва посоката през товара, но тече обратно към захранващия източник. Изходното напрежение в този участък на работа е отрицателно.

ЗАДАЧИ НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

Във връзка с реализирането на формулираната цел и осъществените проучвания на проблема се поставят следните задачи на дисертационния труд:

1. Да се изберат и анализират съществуващи схемни решения с оглед установяването, приложимостта им за целите на управлението на магнитни сепаратори.

2. Да се осъществи математичен и симулационен анализ на избраните схемни решения, за установяване на функционални зависимости между електротехническите им параметри в съответствие с технологичните особености на магнитната сепарация.

3. Да се разработи и реализира експериментален физичен модел на полупромишлен магнитен сепаратор.

4. Да се осъществят необходимите експериментални изследвания за установяване на съществените характеристики за реализирането на ефективни импулсни магнитни полета.

5. Да се реализира математична обработка на получените експериментални резултати, с оглед получаване на адекватни математични модели и основни зависимости за проектиране на сепаратори с импулсно управление на магнитното поле.

II. СХЕМНИ РЕШЕНИЯ ЗА ЕЛЕКТРОМАГНИТНА СЕПАРАЦИЯ С ИМПУЛСНИ МАГНИТНИ ПОЛЕТА

Електрическата схема трябва да има възможност за създаване на импулсно – бягащо магнитно поле с постояннотокови импулси, пулсиращи с различна продължителност и сила, в зависимост от магнитната възприемчивост на рудата и едрината на смилане.

2.1 Схема с повишено бързодействие за електромагнитна сепарация с импулсно магнитно поле

2.1.1 Описание на съществуващата експериментална установка

Първоначално при експерименталните изследвания в електрическата схема се използва диоден еднофазен мостов изправител. Той служи за създаване на постояннотокови импулси чрез включване и изключване на контакт в променливотоковата му страна.

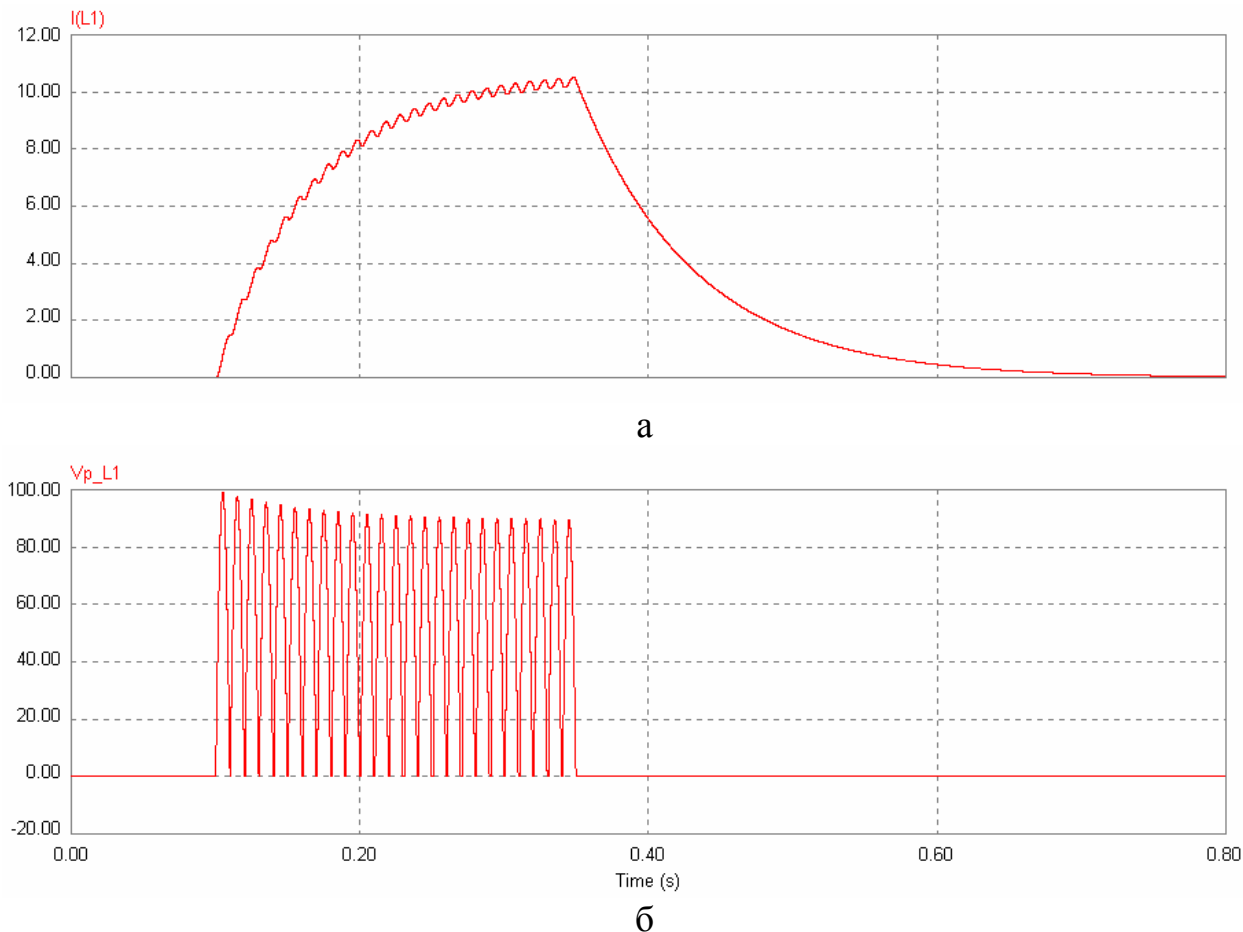
За осигуряване на необходимото напрежение за електромагнитна система състояща се от отделни електромагнити, свързани в групи се използва силов съгласуващ трансформатор. Вторичното му напрежение е с ефективна стойност 70 V, подходящо за достигане на установен ток около 10 A при един от вариантите на свързване на бобините. Токът зависи от активното съпротивление на електромагнитите и се определя от съединяването им – последователно, паралелно или смесено.

Съществен недостатък при използването на електрическа схема на базата на диоден еднофазен мостов изправител е малкото ефективно време за действие на магнитната сила действаща върху магнитните частици в работния обем на ваната в сравнение с времето за включено състояние на бобините. Това е така, защото нарастването на тока е относително бавно сравнено с необходимите технологични времена на периода за включване. Друг още по-значителен недостатък на схемата с диоден изправител е също бавното намаляване на тока при изключване. Това довежда до сравнително дълго време на задържане на магнитните частици от обработваната суспензия към полюсите на електромагнитите след изключване на контакта в променливо токовата страна на изправителя.

2.1.2 Сравнителни характеристики на изследваните схеми

На фиг. 2.1.2 са показани две взаимно зависими графики, резултат от симулацията на схемата от съществуващата експериментална установка. Фиг. 2.1.2а представя тока в ампери през индуктивността на електромагнитите, а фиг. 2.1.2б напрежението във волтове на изводите на им. На фигурата се виждат процесите в схемата при включване на ключа S1 в 0,1-та секунда и изключването в 0,35-та секунда от началото на симулацията. Времето за включено състояние е 250 мили секунди, което е от порядъка на времената използвани по технологични съображения .

Явлението за поддържане на тока през товара след изключване на изправителя в променливотоковата страна се дължи на запасената енергия в индуктивността и наличието на верига осигуряваща протичането му. Диодите на изправителя са съединени в затворена верига с индуктивността на товара в права посока.



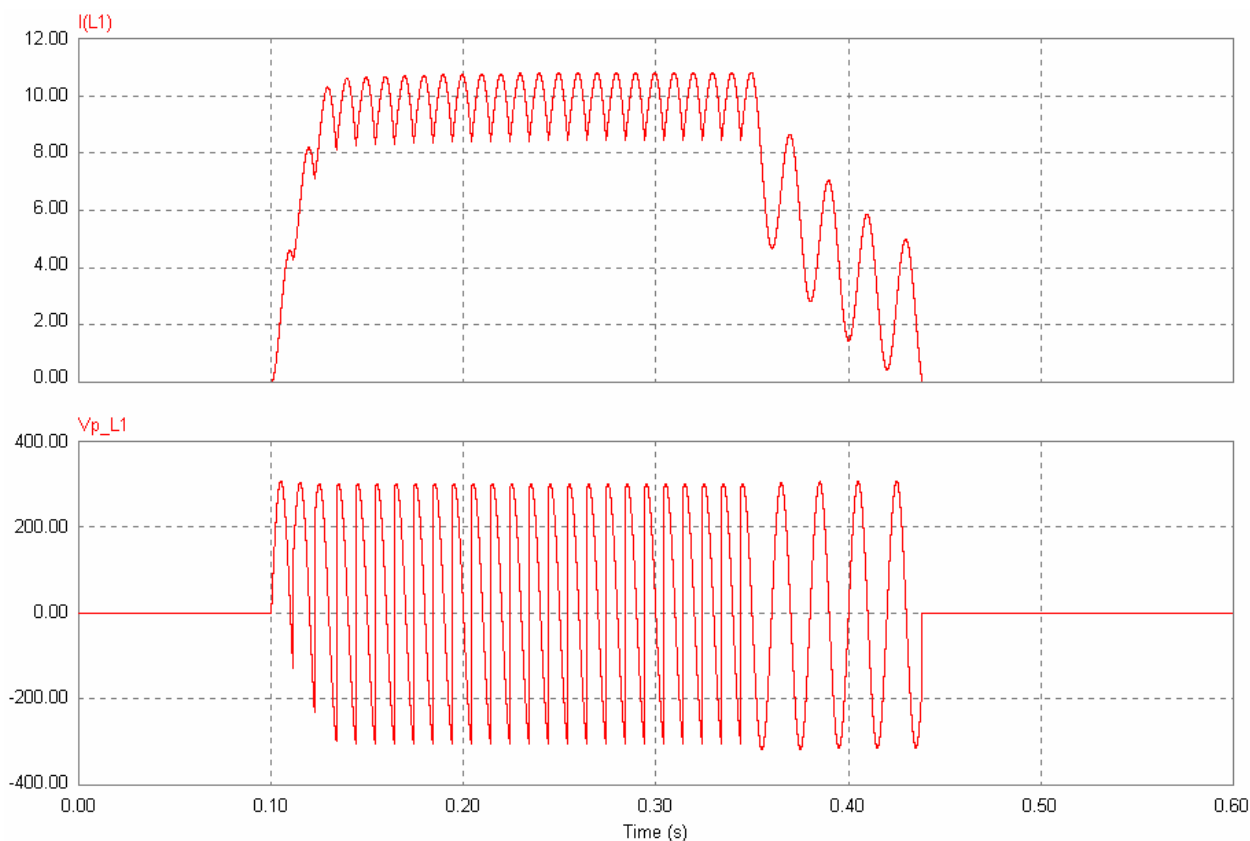
фиг. 2.1.2

Предлага се на мястото на неуправляемия (диоден) изправител се използва регулируем еднофазен мостов изправител изпълнен с четири тиристора.

При схемата с тиристорен изправител захранването е директно от мрежовото напрежение без използване на силов съгласуващ трансформатор. По този начин неговото максимално изправено напрежение е значително по-голямо. Останалите параметри в схемата са запазени.

Действието на схемата се изяснява с помощта на фиг. 2.1.4, където са показани, както и при първата схема, графики, резултат от симулацията, съответно тока в амperi през електромагнитите и напрежението във волтове на изводите им. Ъгълът на управление $\alpha=0$ съответства на максималното напрежение на тиристорния изправител. Това е необходимо за намаляване времето за нарастване на токовия импулс. След това ъгълът на управление α постепенно се увеличава до определена стойност, което води до намаляване средната стойност на изправеното напрежение с цел достигане на установен ток от 10 A.

От фиг. 2.1.4 се вижда, че е постигнато е съкращаване на времето за нарастване на токовия импулс около пет пъти. В нерегулируемата диодна схема времето е приблизително 250ms срещу около 50ms за тиристорната схема. Това довежда до по-пълно използване на времето на токовия импулс за движение на частиците в работния обем на електромагнитния сепаратор.



фиг. 2.1.4

Приблизително три пъти е намалено времето за спадане на токовия импулс.

Освен това, с приложението на тиристорна схема включването и изключването става чрез използване на силови полупроводникови елементи. За разлика от диодната схема, тиристорният изправител е захранен директно от мрежовото напрежение без използване на силов съгласуващ трансформатор.

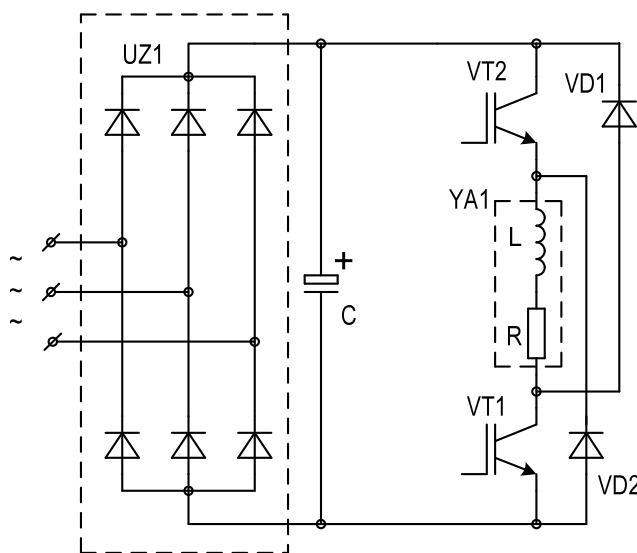
2.2 Силов импулсен преобразувател за електромагнитна сепарация

Тиристорната схема разгледана в т.2.1 показва сравнително добри резултати, но трябва да се отбележи, че при по-мощни съоръжения, примерно над 10 kW, би се наложило да се използва трифазен управляем тиристорен изправител. Това ще усложни и оскъпи значително устройството.

Във връзка с описаните недостатъци на разгледаните до тук схеми за управление се разглежда схема изградена на принципа на постояннотоков импулсен преобразувател (асиметричен полумостов преобразувател), която до настоящия момент не е използвана за управлението на магнитни сепаратори.

2.2.1 *Формиране на постоянно токови импулси в електромагнитната система на сепаратор*

Работата на тази схема за формиране на токовия импулс може да се разглежда в три различни състояния. Всяко, от които, имащо значение за формата на тока. В началото за нарастването на тока, се отпушват и двата транзистора VT1 и VT2. Второто състояние на схемата е при запушен транзистор VT1 и отпушен транзистор VT2. Токът поддържан от индуктивността се затваря през веригата на диода VD1 и транзистора VT2. Третото състояние на схемата – в края на токовия импулс, когато се запущват и двата транзистора, запасената електромагнитна енергия от електромагнита YA1 се връща към кондензатора C през диодите VD1 и VD2. Затова в тази схема кондензаторът C е абсолютно необходим за работоспособността на устройството. Ако липсва или е с твърде малък капацитет в схемата биха се получили недопустимо високи пренапрежения.

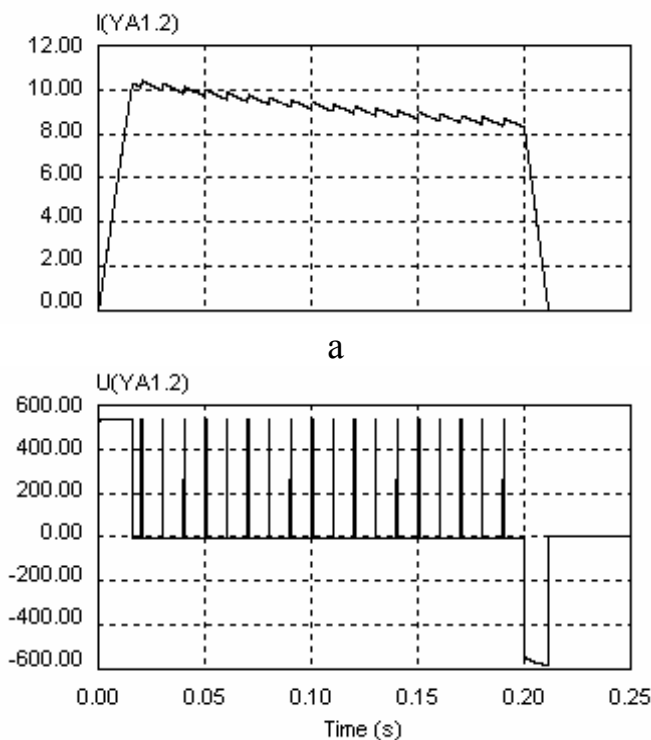


фиг. 2.2.2

2.2.2 *Сравнение на схемни решения на импулсни преобразуватели за електромагнитна сепарация*

На фиг. 2.2.4 са показани две взаимно зависими графики, резултат от симулацията на фиг. 2.2.2. Графиката на фиг. 2.2.4а, представлява тока в амperi през електромагнитите, а фиг. 2.2.4б – напрежението във волтове на изводите им. Съществено е, че спадащият фронт на токовия импулс в схемата (фиг. 2.2.4а) намалява значително по-бързо от колкото в разгледаните до тук схеми. Това е търсен ефект, той се дължи на специфичното свързване на двата диода VD1 и VD2, които се отпушват след запущването на транзисторите VT1 и VT2. Диодите са отпушени докато токът не спадне до нула, т.е. цялата електромагнитна енергия запасена в индуктивността не се отдаде. Голяма част от нея се връща в електролитния кондензатор (или батерия от паралелно и последователно съединени кондензатори), а много по-малка се разсейва от активните съпротивления във веригата, най-голямото, от които е това на самия електромагнит.

Кондензаторите присъединени към постояннотоковата шина са със сравнително голям капацитет, който е решаващ за нарастването на напрежението върху тях. Стойността, до която достига напрежението, освен от капацитета и активното съпротивление във веригата, зависи и от стойността на тока през индуктивността в момента на запусване на транзисторите VT1 и VT2.



б
фиг. 2.2.4.

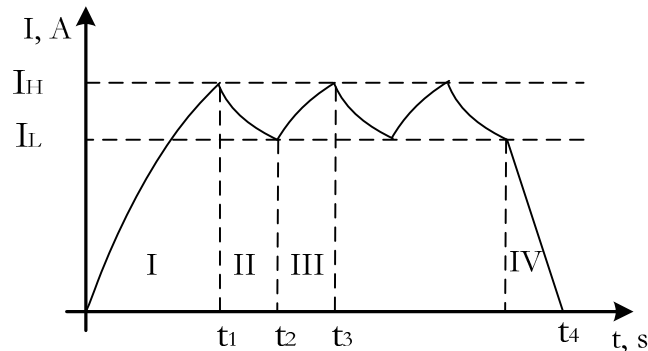
Стръмността на фронтовете на токовете импулси в електромагнитната система на сепаратора позволява ускоряване на технологичния процес по разделяне на фракциите на феромагнитната суспензия. Изследването показва предимствата, които има асиметричният плумостов (двухтранзисторен) импулсен преобразувател (фиг. 2.2.2) в това отношение. Освен това загубите на електрическа енергия са малки, поради ефекта на връщането на запасената електромагнитна енергия от електромагнита към кондензаторната батерия.

Постигнатото време за нарастване на токовия импулс (≈ 20 ms), за достигане на ток с необходимите технологични стойности (≈ 10 A), се дължи на захранването от сравнително високо напрежение и на схемите за широчинно импулсна модулация. Постига се по-пълно използване на времето на токовия импулс за движение на магнитните частици в работния обем на електромагнитния сепаратор. Захранването, директно от мрежовото напрежение, прави възможно избягването на силов съгласуващ трансформатор.

Многократно е намалено времето за спадане на токовия импулс в схемата на асиметричният плумостов (двухтранзисторен) импулсен преобразувател представен на фиг. 2.2.2. Намаленото време на спадащият фронт гарантира по-бързото отпускане на магнитните частици и своевременното им транспортиране по дължината на ваната на електромагнитния сепаратор.

2.2.3 Математически анализ на работата на асиметричен полумостов импулсен преобразувател за магнитна сепарация

За математическия анализ на процесите в схемата (фиг. 2.2.2) е удобно да се съставят заместващи схеми за четирите етапа на формиране на работния ток импулс (фиг. 2.2.8). В заместващите схеми (фиг.2.2.9), (фиг.2.2.10) (фиг.2.2.11) за простота транзисторите VT1 и VT2 са представени като ключове K1 и K2, а диодите VD1 и VD2, когато не провеждат ток не се показват.

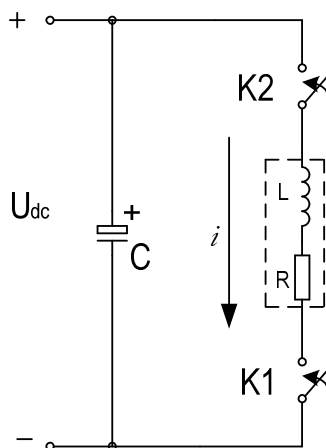


фиг. 2.2.8

Първи етап. Включени са VT1 и VT2, а токът нараства от нула до зададена стойност. За нея се съставя диференциално уравнение по II закон на Кирхоф, което има вида:

$$\tau \frac{di(t)}{dt} + i(t) = \frac{U_{dc}}{R} \quad (2.2)$$

където: $\tau = \frac{L}{R}$ - времеконстанта



фиг.2.2.9

При начални условия $t=0$ и $i(0)=0$ решението е:

$$i(t) = \frac{U_{dc}}{R} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right) \quad (2.3)$$

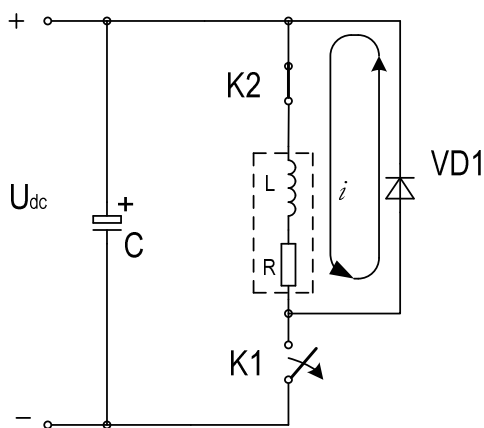
От решението (2.3) следва, че при $t \rightarrow \infty$, т.е. в установен режим токът се определя с изрази:

$$i(\infty) = I_V = \frac{U_{dc}}{R} \quad (2.4)$$

От (2.3) и (2.4) може да се определи времето, за което токът във веригата ще получи желаната максимална стойност в платото на работния импулс (I_H), т.е. за $t=t_1$ и $i(t_1)=I_H$:

$$t_1 = -\ln\left(\frac{I_V - I_H}{I_V}\right)\tau \quad (2.5)$$

Втори етап. На фиг. 2.2.10 е представена заместващата схема отразяваща състоянието - включен транзистор VT2 - съответно K2 и изключен транзистор VT1 - съответно K1.



фиг.2.2.10

Описващото я диференциално уравнение е:

$$\tau \frac{di(t)}{dt} + i(t) = 0 \quad (2.7)$$

За начални условия $t=0$ и $i(0)=I_H$ решението е:

$$i(t) = I_H e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (2.8)$$

За $t=t_2$ и $i(t_2)=I_L$ (I_L е желана минимална стойност на тока в платото на импулса), от (2.8) се получава:

$$I_L = I_H e^{-\frac{t_2}{\tau}} \quad (2.9)$$

От (2.9) се получава времето за намаляването на тока:

$$t_2 = -\ln\left(\frac{I_L}{I_H}\right)\tau \quad (2.10)$$

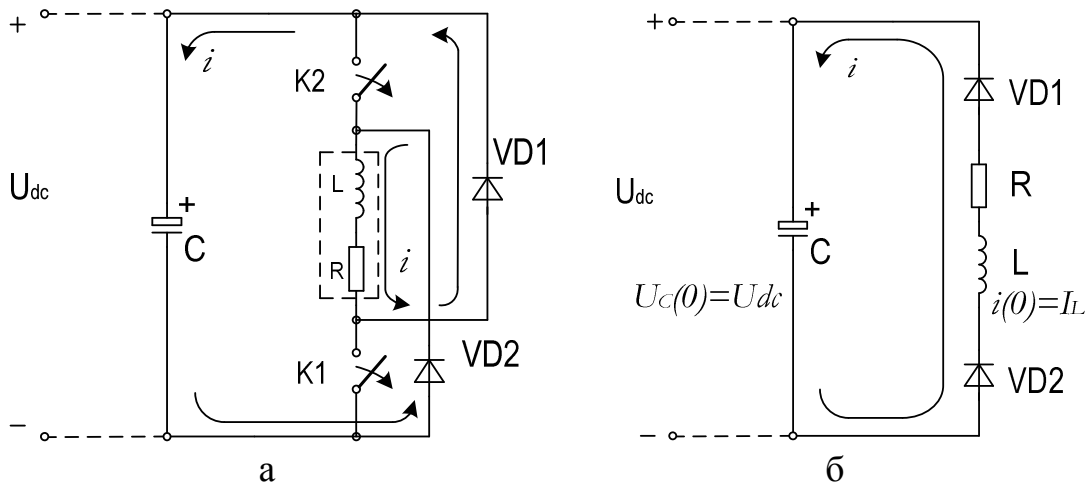
Трети етап. Той представлява вариант на първи етап с тази разлика, че при $t=0$, началният ток има стойност по голяма от нула ($i(0)>0$). Използва се заместващата схема (фиг. 2.2.9).

Решението за $t = (0)$, $i(0)=I_L$ и $i(t_3)=I_H$ е:

$$i(t_3) = I_V \left(1 - e^{-\frac{t_3}{\tau}} \right) + I_L e^{-\frac{t_3}{\tau}} \quad (2.11)$$

$$t_3 = -\ln \left(\frac{I_H - I_V}{I_L - I_V} \right) \tau \quad (2.12)$$

Четвърти етап. На фиг.2.2.11 са представени две напълно еквивалентни по между си заместващи схеми с различна степен на подробност.



фиг. 2.2.11

В конфигурацията на схемата от IV-тия етап са изключени K1 и K2, а токът протича по веригата: електромагнит (L, R), диод (VD1), кондензатор на постоянно токовата шина (C) и диод (VD2).

Този случай се характеризира с по-особени начални условия:

- 1) Кондензаторът C е зареден до напрежението на изводите на изправителя, т.е. $U_C(0)=U_{dc}$;
- 2) През електромагнита (индуктивността) тече ток с определена стойност I_0 .

Диференциалното уравнение описващо процесите в представената заместваща схема е:

$$L \frac{d^2 i(t)}{dt^2} + R \frac{di(t)}{dt} + \frac{1}{C} i(t) = 0 \quad (2.13)$$

Решението за изменението на тока в разглежданата заместваща схема е:

$$i(t) = e^{-\frac{R}{2L}t} \frac{I_0}{\sin \alpha} \sin(\omega t + \alpha) \quad (2.15)$$

тук:

$$\omega = \frac{\sqrt{4\frac{L}{C} - R^2}}{2L} \quad (2.16)$$

е ъгловата честота на тока в колебателния контур, определяща стръмността на задния фронт на импулса;

$$\alpha = \pi - \operatorname{arctg} \left(\frac{2\omega LI_0}{R.I_0 + 2U_{dc}} \right) \quad (2.17)$$

Времето t_4 за спадане на задния фронт на импулса до нула се определя с израза:

$$t_4 = \frac{\pi - \alpha}{\omega} \quad (2.18)$$

Тъй като при разглеждането на етапите на формиране на работните импулси решаването на съответното диференциално уравнение се извършва за начална стойност на времето $t = 0$, времетраенето на работния импулс се определя съгласно израза:

$$t_{II} = t_1 + t_2 + n(t_2 + t_3) + t_4 \quad (2.19)$$

където n е брой на превключванията на ключа К1 при формиране платото на импулса.

2.3 Силов импулсен преобразувател за магнитен сепаратор с размагнитваща функция

От автора се предлага електрическа схема за импулсно управление на магнитен сепаратор с възможност за създаване на променливо магнитно поле с постепенно намаляващ интензитет, за сметка на енергията запасена в електромагнитната система при намагнитването на обработваното вещество, която след това се използва за размагнитването му, с цел разрушаване на флокулите и отделяне на механично включените немагнитни частици.

2.3.1 Принцип и действие на схемата

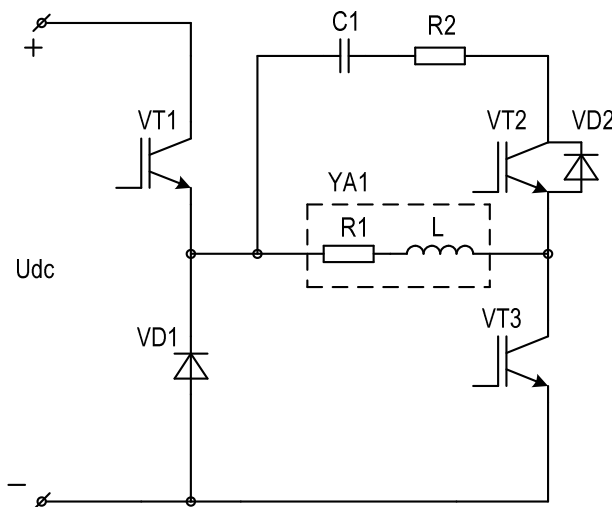
На фиг. 2.3.1 е показана разработената от автора принципната електрическа схема за импулсно управление на магнитен сепаратор. Електромагнитите YA1 от електромагнитната система на сепаратора на схемата са представени опростено чрез заместваща схема от линейни активно съпротивление $R1$ и индуктивност L .

Схемата осъществява реализирането на първите три етапа от фиг. 2.2.8, като освен това осигурява и затихващ колебателен процес в края на работния ток импулс, осъществяващ размагнитването в работната зона на сепаратора.

Колебателния контур на схемата се описва с уравнение (2.13).

Тук началните условия са: $t=0$, $u_C(0) = 0$; $i(0) = I_0$, където I_0 е токът в момента на запущването на транзисторите VT1 и VT3, $R1 + R2 = R$ е общото

активно съпротивление във веригата на колебателния контур, а с C е означен кондензаторът на кондензатора $C1$. Както се вижда разликата в началните условия е тази, че напрежението на изводите на кондензатора C е равно на нула.



фиг. 2.3.1

При тази постановка решението на диференциално уравнение (2.13) е (2.15), като ъгловата честота ω се определя с израз (2.16) а за началната фаза α се получава:

$$\alpha = \arctg \frac{\sqrt{4 \frac{L}{C} - R^2}}{R} \quad (2.21).$$

Тъй като на практика началната фаза α има стойности близки до $\frac{\pi}{2}$ [rad]:

$$\begin{aligned} \frac{I_0}{\sin \alpha} &\approx I_0; \\ \sin(\varphi t + \alpha) &\approx \cos \varphi t \end{aligned}$$

решението е

$$i(t) = e^{-\frac{R}{2L}t} I_0 \cos \omega t \quad (2.22)$$

Това решение напълно удовлетворява изискването за определяне на допълнителното съпротивление във веригата R_2 според изказа:

$$R_2 = -\frac{2L}{t} \ln \frac{I_m(t)}{I_0} - R_1. \quad (2.23)$$

Въз основа на израз (2.16) се определя необходимият капацитет C на кондензатора $C1$ съгласно изказа:

$$C = \frac{4L}{4L^2 \omega^2 - R^2}. \quad (2.24)$$

В заключение на Глава II, в резултат от извършените теоретични изследвания и реализирани симулационни модели, могат да се формулират следните

ИЗВОДИ:

1. За схемата с диоден изправител (фиг.2.1.1)е установено:

а/ Сравнително дълго време се задържат магнитните частици към полюсите на електромагнитите.

б/ Малко ефективно време за действие на магнитната сила върху магнитните частици в работния обем, сравнено с общото време за включено състояние на бобините.

2. За схемата с тиристорен изправител (фиг. 2.1.3):

а/ Възможността за регулиране на тиристорния изправител води до отпадане необходимостта от силов съгласуващ трансформатор. Изправителят се захранва директно от мрежовото напрежение.

б/ При едни и същи параметри на магнитна система на сепаратора се съкращава времето за нарастване на тока около пет пъти в сравнение със схемата, изпълнена с диоден изправител (фиг.2.1.1).

в/ Три пъти е намалено времето за спадане на токовия импулс.

г/ Създадена е предпоставка за намаляване на общото време за пребиваване на материала в работната зона. Сепараторът може да работи с по-високи скорости на преминаване на феромагнитната суспензия.

д/ За по-мощни електромагнитни системи /над 10 kW/ е наложително използването на трифазен управляем изправител, което може да се смята за недостатък на схемата.

3. За схемата “Асиметричен, полумостов импулсен преобразувател” (фиг. 2.2.2):

а/ Възможността за регулиране на преобразувателя води до отпадане необходимостта от силов съгласуващ трансформатор.

б/ постигната е висока стръмност на токовите импулси, предпоставка за ускоряване на технологичния процес в сравнение със схемите от фиг. 2.1.3. и фиг. 2.2.1.

в/ намалени са загубите на електрическа енергия, поради ефекта на връщане на запасената електромагнитна енергия от електромагнита към кондензаторната батерия.

г/ Схемата притежава несъществен недостатък свързан с необходимостта от кондензатор със сравнително голям капацитет.

4. Предложената оригинална схема за управление на магнитен сепаратор, притежава всички предимства на схемата за управление, реализирана с асиметричен полумостов преобразувател (фиг. 2.2.2) и освен това в сравнение с всички разгледани схеми се отличава с възможността да разрушава флокулите на обогатявания материал / суровина / вътре в работната зона на сепаратора.

III. МАТЕМАТИЧЕСКО ОПИСАНИЕ И АНАЛИЗ НА ЕЛЕКТРОМАГНИТНИТЕ ПРОЦЕСИ В СЕПАРАТОРИ С ИМПУЛСНИ МАГНИТНИ ПОЛЕТА

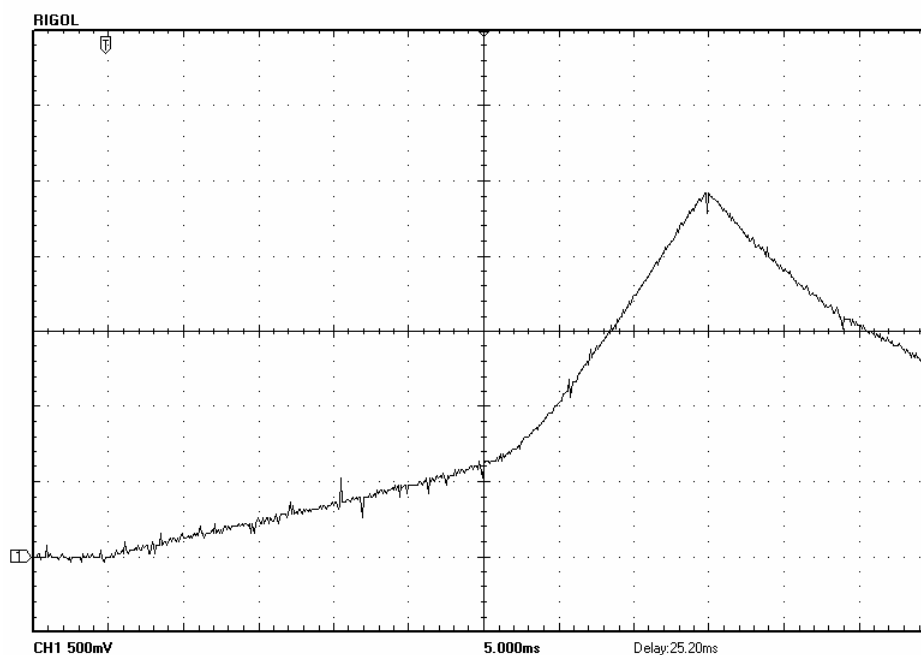
За изпълнение на задачите на дисертационния труд е реализиран физически модел на електромагнитния сепаратор, обзаведен с практически разработено, от автора, управляващо устройство. То е изпълнено по схемата на асиметричен полумостов импулсен преобразувател (фиг. 2.2.2) - теоретично изследвана в т. 2.2.3.

Върху така реализирания физически модел с качествата на полупромишлена инсталация за магнитно сепариране се осъществяват експерименталните изследвания и анализа на процесите.

3.1 Избор на метод и средства за измерване параметрите на електромагнитното поле и резултати от измерванията.

При експерименталните изследвания на схемата за управление на физическия модел на електромагнитния сепаратор се установи появата на изразена нелинейност при изменението на тока (фиг. 3.1.1), което очевидно се дължи на голямата стойност на протичащите импулсни токове, необходими за създаването в сравнително големия обем на работната неферомагнитна среда на поле със значителна магнитна индукция. В ограничения обем на феромагнитната сърцевина, това води до насищане на магнитопровода.

Тази особеност налага експерименталното изследване на картината на магнитното поле в работната зона на сепаратора и магнитопровода на електромагнитите. За получаване на конкретни резултати от експеримента от съществено значение е изборът на метод и средства за измерване.



фиг. 3.1.1

3.1.1 Пасивни индукционни преобразуватели

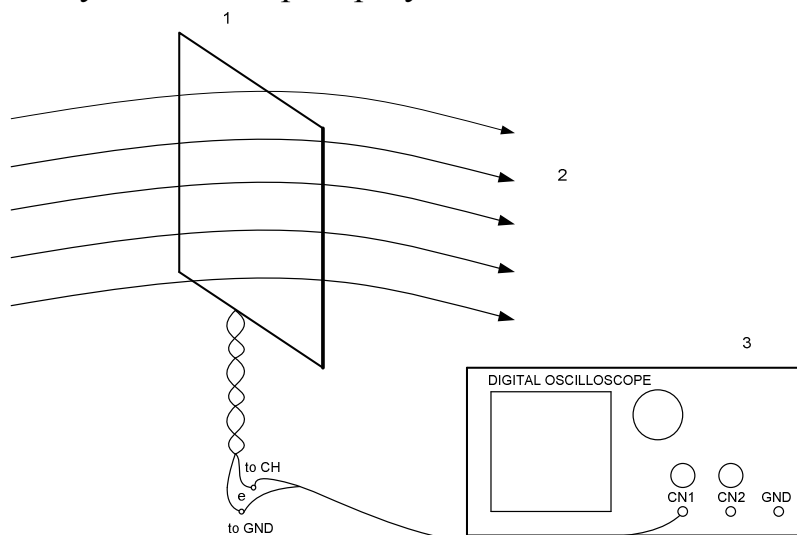
Въз основа на закона на електромагнитната индукция, индукционни преобразуватели преобразуват измерваната величина в пропорционално на нея електродвижещо напрежение.

$$e[\vec{B}_0(t)] = -ws \cos \alpha \frac{dB_0}{dt} = -ws \frac{dB}{dt} = -w \frac{d\Phi}{dt} = -\frac{d\Psi}{dt}; \quad (3.9)$$

В (3.9) с B , Φ и Ψ са означени нормалните (спрямо s) компоненти на индукцията, потока, и потокосцеплението на преобразувателя.

На израз (3.9) ще се базират изискванията към параметрите и разположението на измервателните бобини и изводите за характеристиките на магнитното поле въз основа на експерименталните изследвания.

На фиг. 3.1.2 е представена идеята за измерване с помощта на измервателна бобина - /1/. Всяка от навивките W на измерителната бобина обхваща магнитен поток Φ - /2/. Потокосцеплението $\Psi = w\Phi$ е първичната измервана, т.е. входната, за индукционния преобразувател, величина.



фиг.3.1.2

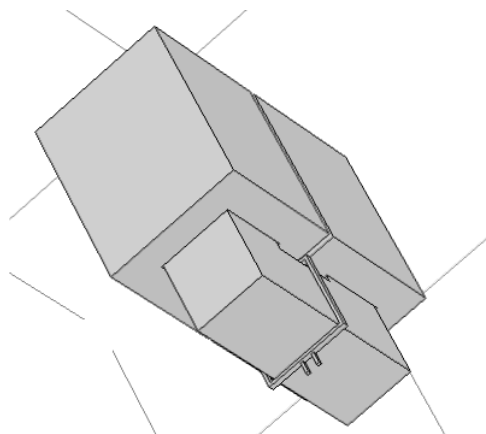
Измерваната величина, в зависимост от измервателния уред - /3/, включен в схемата, и в зависимост от вида на магнитното поле, може да е електродвижещо напрежение, ток, или количество електричество. В случая на фиг. 3.1.2 величината е електродвижещо напрежение, а за измервателен уред се използва цифров осцилоскоп.

3.1.2 Снемане на опитни данни и построяване на Вебер-амперните характеристики.

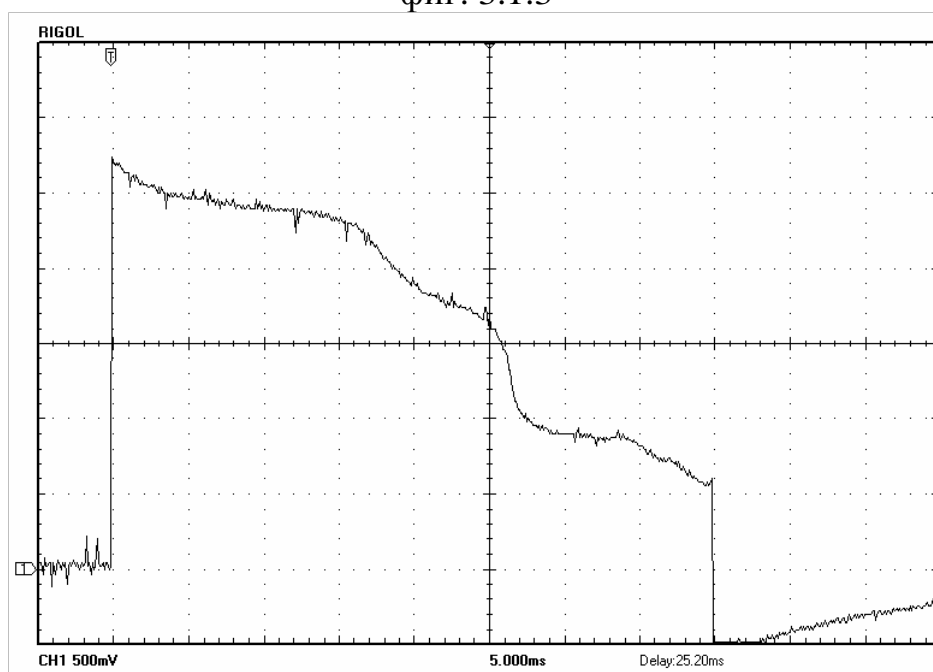
За получаване на Вебер-амперната характеристика е използван следният подход. Измерването се прави при подаване на единичен стъпален напреженов импулс на изводите на намагнитващата бобина на експерименталния електромагнит. За потока се съди по интегрирания сигнал на електродвижещото напрежение, получено на изводите на измервателна бобина (пасивен индукционен преобразувател). Едновременно се снемат данните за тока.

За изчисляване на потока са избрани три характерни участъка от магнитната верига, а именно феромагнитната част на магнитопровода обхващаща възможно най-добре магнитния поток, полюсния накрайник на електромагнита и работната зона. В тези участъци се снемат индуктираните електродвижещи напрежения в измервателните бобини, разположени по подходящ начин.

На фиг. 3.1.3 е показано разположението на измервателната бобина в постановката за снемане формата на електродвижещото напрежение получено при изменението на магнитния поток във феромагнитната сърцевина на електромагнита.



фиг. 3.1.3

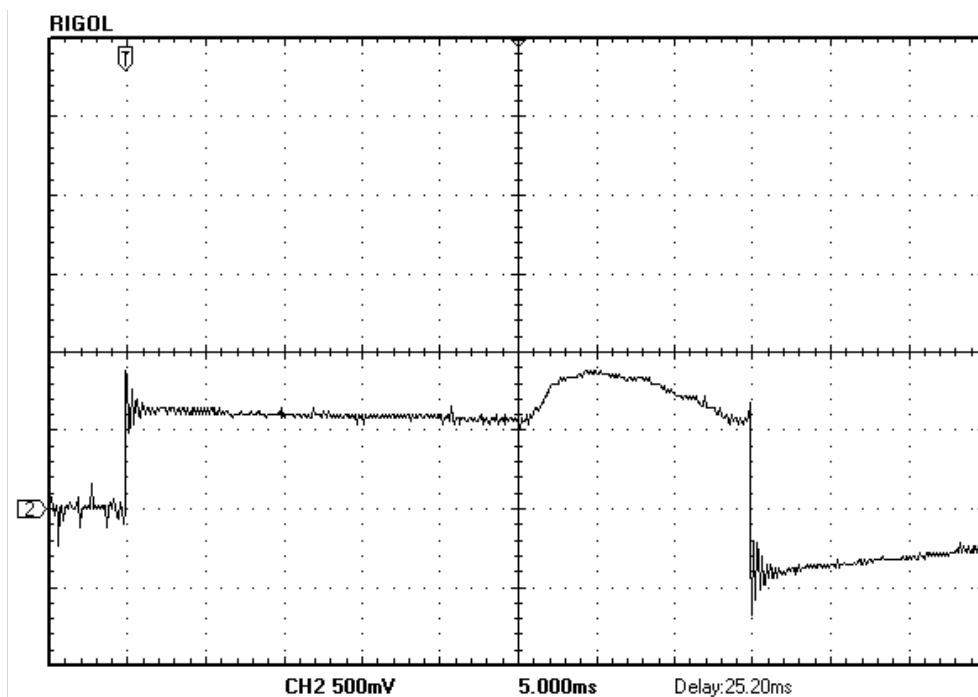


фиг.3.1.4

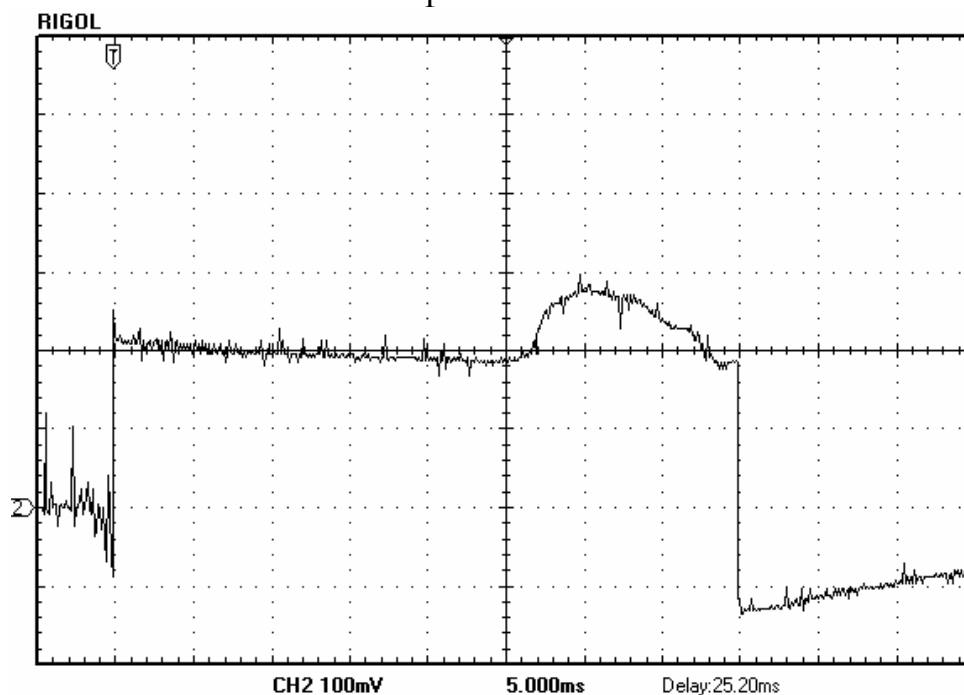
Едната сонда на осцилоскопа е свързана към шунтово съпротивление със стойност $0,1\Omega$ последователно свързано с намагнитващата бобината на електромагнита. Обхвата на този канал е $500\text{mV}/\text{деление}$, а обхвата за времето е $5\text{ms}/\text{деление}$. Напрежението на подавания импулс от управляващото устройство е със стойност 580V и времетраене 40ms . Графиката за изменението на тока през бобината, за времето на подавания от управляващото устройство импулс е дадена на фиг. 3.1.1.

По същото време, с другата сонда е снето индуктираното електродвижещо напрежение (фиг. 3.1.4) в измервателна бобина с 10 навивки, навита върху феромагнитната част на магнитопровода (фиг. 3.1.3).

Електродвижещото напрежение получено, при същите условия, на изводите на друга измерителна бобина, също с десет броя навивки, обхващаща полюсния накрайник на електромагнита е показана на фиг. 3.1.6.



фиг. 3.1.6



фиг. 3.1.8

На фиг. 3.1.8 е показано електродвижещото напрежение, при обхват 100mV/деление, за работната зона на сепаратора. Измервателната бобина е поставена перпендикулярно между двата полюса на магнитопровода.

3.2 Аналитична апроксимация на нелинейни характеристики

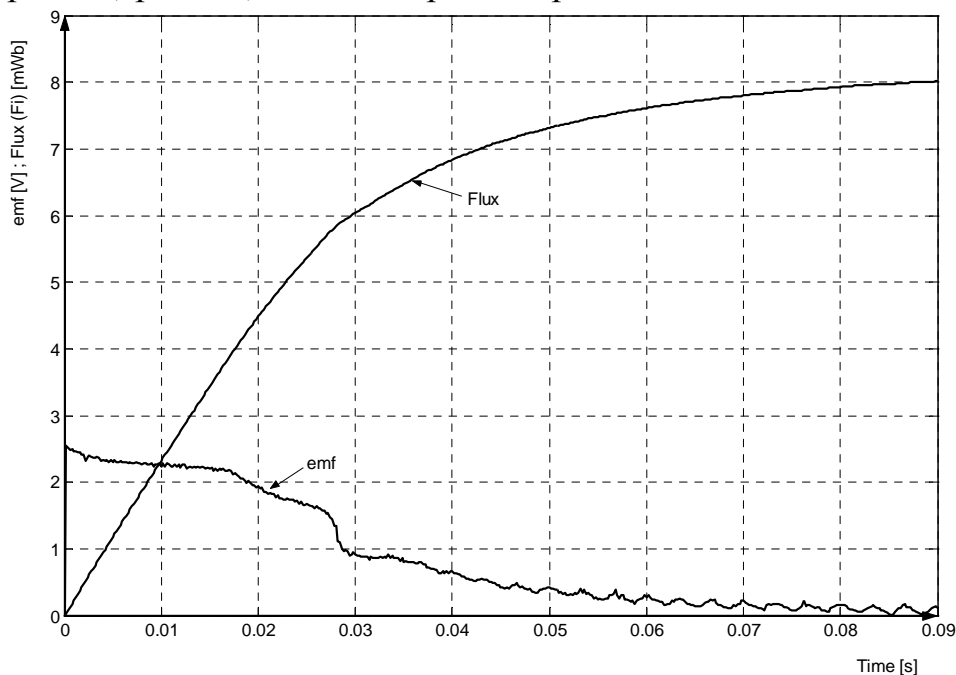
Апроксимирането на зададена характеристика се основава избора на вида на заместващата функция и на уточняване на нейните коефициенти.

3.2.1 Апроксимиране характеристиката на експериментален електромагнит

Съгласно съществуващите методи за аналитична апроксимация, нелинейните криви се апроксимират с аналитичен израз, който трябва да отговаря на следните условия:

- да е достатъчно близък до реалната нелинейна характеристика;
- да позволява сравнително лесно решаване на уравненията.

В настоящата дисертация е разработен вариант на метода за аналитична апроксимация, при който апроксимиращата функция $\Psi = \Psi(i)$ не се изразява директно, а се представя параметрично, т. е. $\Psi = \Psi_1(t)$ и $i = i_1(t)$, където параметърът t (времето) може да приема произволни стойности.



фиг. 3.2.4

Анализ на работата на системата. Разглежда се състоянието - отворени електронни ключове (отпушени транзистори) – VT1 и VT2, на реализираното управляващо устройство по схемата на асиметричен полумостов импулсен преобразувател (фиг. 2.2.2 от т. 2.2.1). Това състояние отговаря на нарастващия фронт на тока.

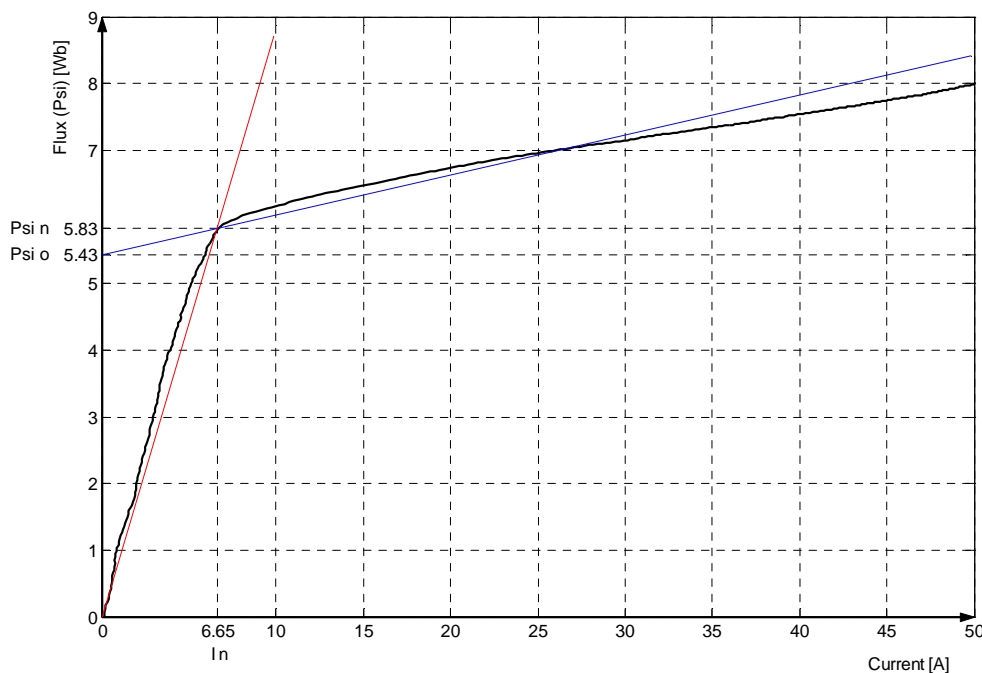
След обработката в Matlab на данните (в числов вид) за тока и електродвижещото напрежение от файловете записани чрез цифров осцилоскоп, са получени графиките на потока (фиг. 3.2.4) и Вебер-амперната характеристика. На фиг. 3.2.4, освен потока, допълнително е представено електродвижещото напрежение, на графиката, означено с "emf", а с "Flux" е посочената графика на потока (Φ) в mWb за 1 навивка на измерителната

бобина. Поради наличието на значителни смущения в данните за тока графиката е построена след преминаване през изглаждаща процедура.

Математичен модел на Вебер-амперната хатактеристика на електромагнитната система **базирана на линейно-отсечкова апроксимация**.

Вебер-амперната характеристика е приведена към бобина с 1000 навивки т.е. $\psi = 1000\Phi$ (фиг.3.2.6).

Апроксимирането с две прави е показано на фиг. 3.1.6.



фиг. 3.2.6

Уравненията на двете прави са:

- за участъка от 0 до Ψ_n ,

$$\psi = L_1 i,$$

$$\text{където } L_1 = \frac{\Psi_n}{I_n}$$

- и за участъка $\psi > \Psi_n$,

$$\psi = \Psi_n + L_2 (i - I_n),$$

$$\text{където } L_2 = \frac{\Psi_n - \Psi_o}{I_n}$$

За интервала $0 \leq i(t) \leq I_n$ при начални условия $t=0 \ i(0) = 0$

Моментът t_n за който токът i достига стойността I_n се определя от равенството:

$$I(t_n) = I_n \Rightarrow t_n = -\frac{L_1}{R} \ln\left(1 - \frac{RI_n}{U}\right) \quad (3.12)$$

За интервала $I_n < i(t) < \frac{U}{R}$ при начални условия $t > t_n$, $i(t)=I_n$, времето за достигане на зададения ток $i(t)$ е:

$$t = t_n - \frac{L_2}{R} \ln \left(1 - \frac{i(t) - I_n}{\frac{U}{R} - I_n} \right) \quad (3.15)$$

Математичен модел на Вебер-амперната хатактеристика на електромагнитната система базирана на нелинейна апроксимираща функция.

От фиг. 3.2.7 се вижда, че кривата е съставена от два участъка, които се различават достатъчно отчетливо. Първият участък за $0 \leq i_\partial < i_{\partial n}$ е криволинеен, а вторият, за $i_\partial \geq i_{\partial n}$, при който магнитната сърцевина е наситена, достатъчно точно може да се апроксимира с права. Тук стойността $i_{\partial n}$ на тока на насищане се определя в зависимост от някаква избрана минимална стойност на $\frac{d^2\psi_\partial(i_\partial)}{d^2i_\partial}$. Приема се, че апроксимираната крива $\psi(i)$

трябва да отговаря на следните условия:

$$\begin{aligned} \psi(0) &= 0 ; \psi(i_H) = \Psi_H ; \\ \left(\frac{d\psi(i)}{di} \right)_{i=0} &= \left(\frac{d\psi_\partial(i_\partial)}{di_\partial} \right)_{i_\partial} = L_{нач}. \end{aligned} \quad (3.16)$$

При предположение, че функцията има следния вид:

$$\psi(t) = \Psi_M \left(1 - e^{-\frac{t}{T}} \right) + \Psi_{1M} \left(1 - e^{-\frac{2t}{T}} \right). \quad (3.17)$$

Диференциалното уравнение е:

$$U = Ri + \frac{d\Psi}{dt} \text{ за интервала } 0 \leq t \leq t_n, \text{ където } \Psi(t_n) = \Psi_n.$$

Началното условие е $\Psi(0) = 0$;

Следователно, за да се намери подходящ апроксимиращ израз $\psi = \psi(i)$, уравнението се записва във вида:

$$Ri(t) = U - \frac{1}{T} \left(\Psi_M e^{-\frac{t}{T}} + 2\Psi_{1M} e^{-\frac{2t}{T}} \right); \quad (3.18)$$

От началното условие $i(0)=0$ следва :

$$TU = \Psi_M + 2\Psi_{1M} \quad (3.19)$$

След заместване на U в израза за $i(t)$ се получава:

$$i(t) = \frac{1}{RT} \left[\left(1 - e^{-\frac{t}{T}} \right) \Psi_M + 2 \left(1 - e^{-\frac{2t}{T}} \right) \Psi_{1M} \right] \quad (3.20)$$

Това уравнение заедно с израза за потока (3.17) може да се разглеждат като параметрично задаване на апроксимиращата зависимост $\psi = \psi(i)$. Тук на определяне подлежат три константи: T , Ψ_M и Ψ_{1M} .

Началната стойност на производната $\frac{d\psi(i)}{di}$ се определя от израза:

$$\left(\frac{d\psi(i)}{di}\right)_{\substack{i=0 \\ \Psi=0 \\ t=0}} = \frac{\psi'(t)}{i'(t)} = \frac{\left(\frac{d\psi(t)}{dt}\right)_{t=0}}{\left(\frac{di(t)}{dt}\right)_{t=0}} \quad (3.21)$$

Като се вземе предвид, че за $t=0$, $i(0)=0$, $\left(\frac{d\Psi}{dt}\right)_{t=0} = U$ и като се намери

$i'(t)$ от (3.20) се получава

$$L_{нач.} = \frac{U}{\frac{1}{RT^2}(\Psi_M + 4\Psi_{1M})} \quad (3.22)$$

С цел да се получи по-голяма универсалност на резултатите от анализа, се въвеждат нормирани (базисни) стойности на участващите параметри, при което се получават зависимости между бездимензионни (безразмерни) величини.

Величините в относителни единици се означават с индекси "0". Така се написват следните бездимензионни изрази:

$$T_0 = \Psi_{M0} + 2\Psi_{1M0} \quad (3.23a)$$

$$T_0^2 = \Psi_{M0} + 4\Psi_{1M0} \quad (3.23b)$$

Полага се $\frac{\Psi_{1M0}}{\Psi_{M0}} = \alpha(\Psi_{M0})$, след което се написва:

$$(1+2\alpha)^2 \Psi_{M0} = 1+4\alpha \quad (3.24)$$

зависимост на α от Ψ_{M0} , е представена на фиг. 3.2.7

При избрана стойност i_n на тока, за която се преценява, че нелинейността намалява средната индуктивност за действителната Вебер-амперна характеристика е

$$L_{cp} = \left(\frac{\Psi_\delta(i)}{di}\right)_{i=i_n} = \left(\frac{d\Psi(i)}{di}\right)_{i=i_n}, \text{ където } \left(\frac{d\Psi(i)}{di}\right)_{i=i_n} \text{ е средната индуктивност на}$$

апроксимиращата характеристика при същата стойност i_n на тока.

Нека при развитието на процеса токът i_0 и потокът ψ_0 достигат стойности I_{0n} , съответно Ψ_{0n} в момента t_{0n} . От формули (3.20) и (3.17), написани в относителни единици следа:

придобиват вида:

$$I_{0n} = \frac{1}{T_0} [(1-x)\Psi_{0M} + 2(1-x^2)\Psi_{10M}] \quad (3.27)$$

$$\Psi_{0n} = \Psi_{0M}(1-x) + \Psi_{10M}(1-x^2) \quad (3.28)$$

където $x = e^{-\frac{t_{0H}}{T_0}}$

Като се има предвид, че $\Psi_{10M} = \alpha\Psi_{0M}$ и уравнения (3.27) и (3.28) :

От изрази (3.23) следва $T_0 = \frac{1+4\alpha}{1+2\alpha}$, от където следва уравнението:

$$L_{cp0} = \left(\frac{1+4\alpha}{1+2\alpha} \right) \left(\frac{1+\alpha(1+x)}{1+2\alpha(1+x)} \right) \quad (3.30)$$

Уравнения (3.28) и (3.30) и зависимостта $\alpha = \alpha(\psi_{0M})$ (3.24) представляват три независими уравнения с три неизвестни - Ψ_{0M} , x , α . Най-удобно се решават по метода на последователните приближения.

Като се има предвид, че α слабо зависи от ψ_{0M} се избира някаква средна стойност на $\alpha_{(1)}$, примерно $\alpha_{(1)} = -0,19$. От уравнение (3.30) се намира стойност на $x_{(1)}$ и от уравнение (3.28) се определя величината $\Psi_{0M(1)}$. След това се определя нова величина $\alpha_{(2)}$ за стойността $\Psi_{0M(1)}$. Описаната процедура се повтаря до получаване на добро съвпадение. Поучените стойности се денормират и се заместват в общия вид на уравненията (3.20) и (3.17).

В заключение на Глава III, в резултат от получените експериментални данни и математичната им обработка, могат да се формулират следните

ИЗВОДИ:

1. За получаването на електромагнитните характеристики на сепараторите с импулсно управление на магнитното поле е подходящ индукционния метод за измерване, съчетан със съвременни компютърни методи за обработка на информацията.

2. Получава се насищане на стоманения магнитопровод, независимо че е отворен, поради голямата стойност на протичащите импулсни токове, необходими за създаването на поле със значителна магнитна индукция в работната зона на сепаратора.

3. Главната трудност при анализа е нелинейността на системата е обусловена от насищането на магнитопровода. За намиране на електротехническите параметри на системата за магнитна сепарация се налага изследване на преходни процеси в нелинейни вериги.

4. За получаването на аналитични решения в общ вид при апроксимацията на нелинейни характеристики, апроксимираща функция може да не се изразява директно, а да се представя параметрично. Предимството е, че параметрично представената апроксимираща функция позволява да се отчете, по отделно, влиянието на изходните параметри върху развитието на изследвания процес.

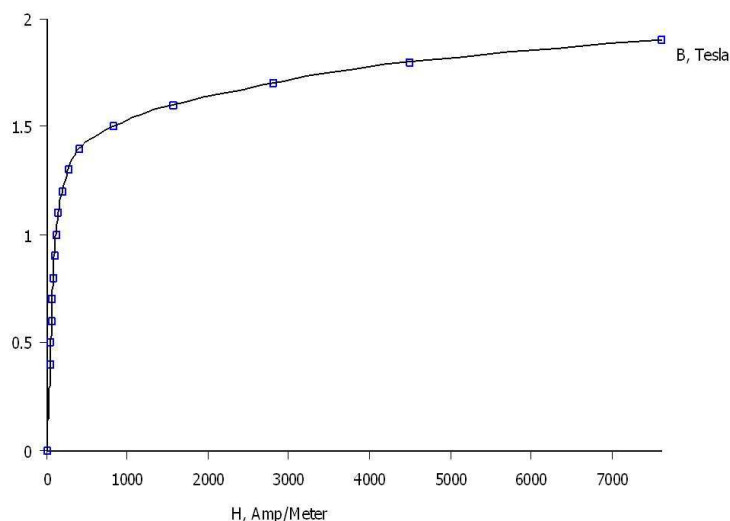
IV. ИЗСЛЕДВАНЕ РАЗПРЕДЕЛЕНИЕТО НА МАГНИТНОТО ПОЛЕ В ЕЛЕКТРОМАГНИТНАТА СИСТЕМА НА СЕПАРАТОР. СИМУЛАЦИОНЕН АНАЛИЗ И ЕКСПЕРИМЕНТИРАНЕ НА ИМПУЛСЕН ПРЕОБРАЗОВАТЕЛ С РАЗМАГНИТВАЩА ФУНКЦИЯ

4.1 Магнитна система на електромагнитния сепаратор. Изследване на магнитното поле

Изследва се електромагнитната система на сепаратор с примерна конструкция дадена в глава 1 на фиг.1.3.5.

4.1.1 Анализ на електромагнит с “П-образна” сърцевина и две намотки в FEMM

Тук се разглежда пример с подобни на експерименталния електромагнит параметри. Анализира се магнитното поле на електромагнит с феромагнитна сърцевина, с “П” формата с външни размери 180x220mm, с две намотки върху него.



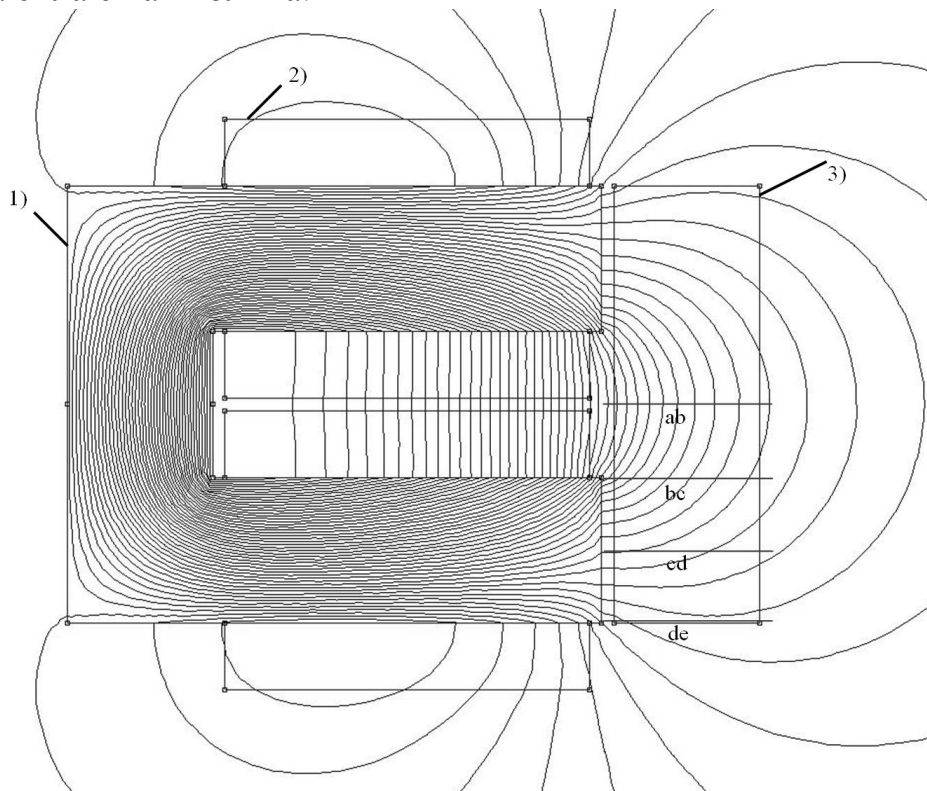
фиг.4.1.2

Анализът на модела се осъществява при зададена крива на намагнитване за електротехническа стомана St2411. Според означението си тази стомана е клас 2 - студено валцувана изотропна и клас 4 по съдържание на силиций (от 2,8% до 3,8%). Стоманите с голямо съдържание на силиций имат по-малки загуби от вихрови токове и хистерезис. Те имат голяма относителна магнитна проницаемост в слаби и средни полета.

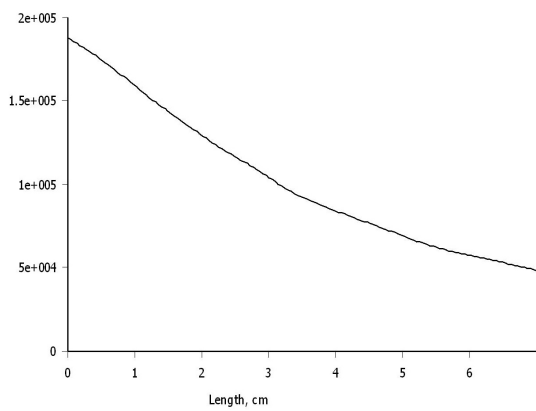
Кривата на намагнитване по въведените данни може да се изчертае с помощта на инструментите заложи в самия продукт (фиг. 4.1.2).

На фиг.4.1.4 са показани модела на електромагнита и магнитните силови линии след симулацията, където с 1 е показан магнитопровода, 2 бобината на електромагнита и с 3 работната зона. Линиите ab, bc, cd, de между полюсите на магнитопровода са необходими за построяването на графиките съответно от фиг.4.1.5 до фиг.4.1.8, на които е показано разпределението на магнитният интензитет в пространството. Стойностите на интензитета са в рамките на технологичните изисквания. От друга страна градиента на изменението на

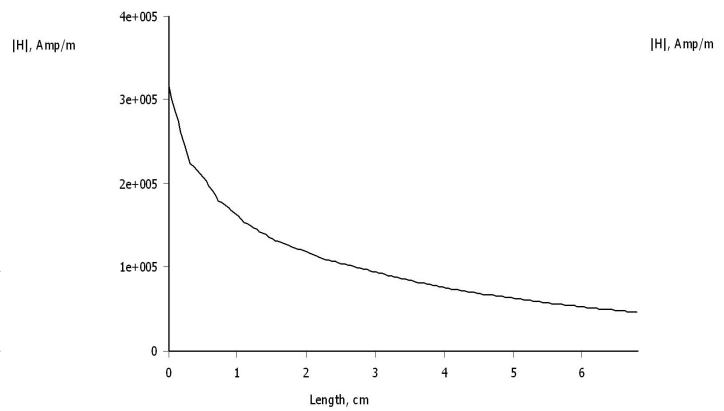
интензитета на полето в работната зона на сепаратора е с най-високи стойности около краищата на полюсите на електромагнита. Следователно в тази зона магнитната сила е най-голяма.



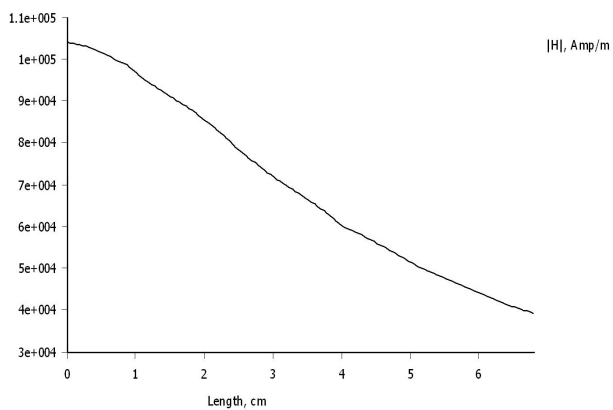
фиг. 4.1.4



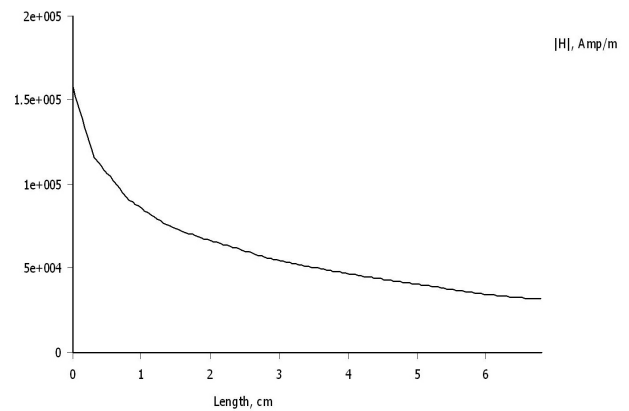
фиг.4.1.5



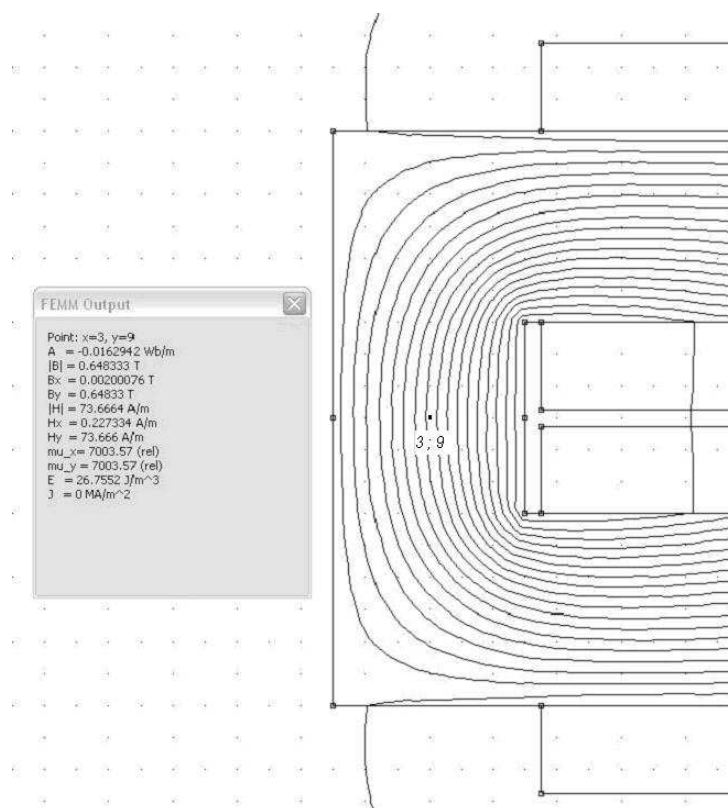
фиг.4.1.6



фиг.4.1.7



фиг.4.1.8



фиг.4.1.11

На фиг. 4.1.11 е показан изходният прозорец със съответните параметри, характеризиращи точката в магнитопровода, с координати (3;9) (координатите на точките са в сантиметри).

	(3 ; 9)		(3 ; 25)	
I, [A]	B ₁ , [T]	H ₁ , [A/m]	B ₂ , [T]	H ₂ , [A/m]
5	0.64	73.66	0.13	103999
10	1.28	492.1	0.26	206933
20	2.07	21503	0.45	358140
30	2.71	45872	0.61	487191

табл.4.1.2

На таблица 4.1.2 са представени резултатите при симулацията с различен ток през бобината, и съответно магнитната индукция и интензитетът на магнитното поле в точка (3;9) на фиг. 4.1.11 и точка (25;9) (точката е в средата на отсечката “ab” на фиг. 4.1.4).

4.2 Изследване на импулсен преобразувател с размагнитваща функция

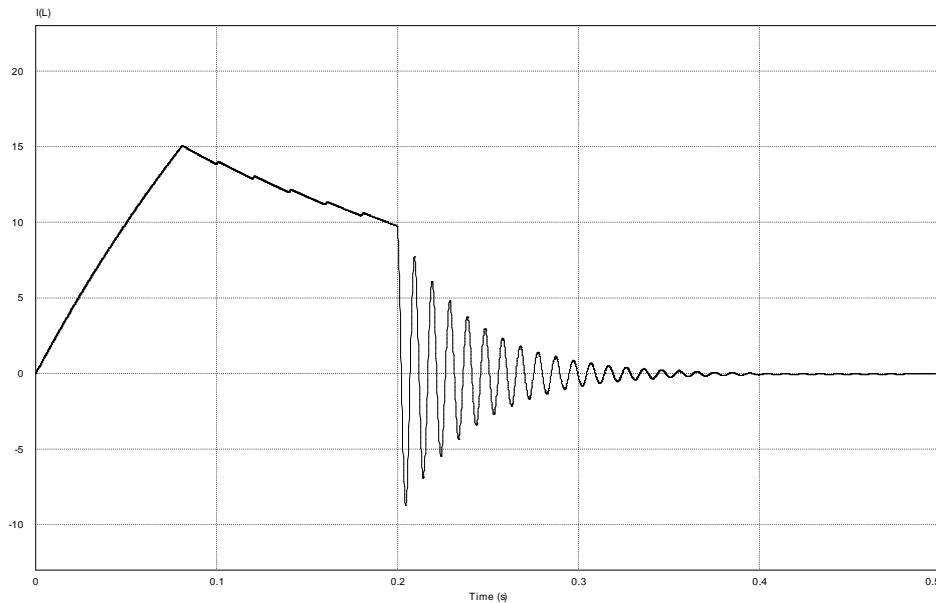
4.2.1 Моделиране и симулиране на преобразувателя

Поставена е задача да се направи компютърна симулация на работата на схемата представена в т. 2.3 (фиг. 2.3.1).

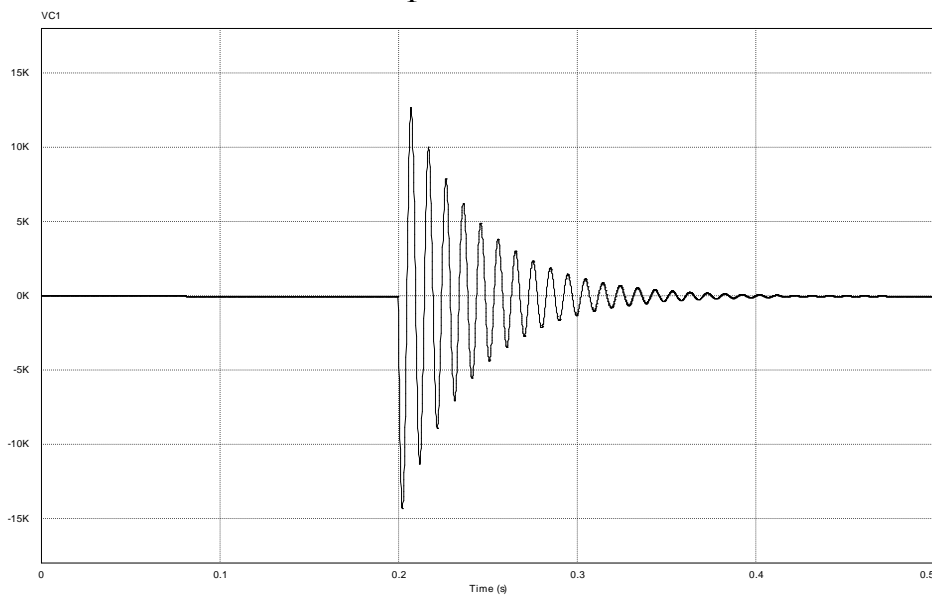
За симулационния анализ се избират примерни стойности на по-важните технологични параметри. Задават се времето t за намаляване на амплитудата на затихващия ток от една първоначална стойност I_0 до друга по-малка стойност

$I_m(t)$, те например може да са съответно $I_0=10A$ до $I_m(t)=1A$ за време $t=0,1s$. При известни параметри на електромагнитната система $R_1=10,6\Omega$; $L=2,4H$, стойността на съпротивлението на допълнителния резистор R_2 се получава 100Ω . При задаването на t трябва да се държи сметка, че е на лице ограничение на времето на затихване на процеса. Максималната му стойност се реализира при $R_2=0$, т.е. при отчитане само на активното съпротивление на бобината на електромагнита

Честотата на колебанията има важно значение за процеса на размагнитване и е определяща за стойността на капацитета на кондензатора в колебателната верига. Практическият технологичен опит показва, че оптималната стойност за определени видове силномагнитни минерални частици е около $100 - 120\text{ Hz}$. Ако се зададе за ъглова честота на колебанията $\omega=625s^{-1}$, което отговаря на честота около 100 Hz , за капацитета на кондензатора $C1$ се получава стойност приблизително $1\mu\text{F}$



фиг. 4.2.3



фиг.4.2.4

И тук електромагнитът е моделиран с последователно свързани линейни активно съпротивление и индуктивност. Резултатите за тока през индуктивността L от направената симулация са представени на фиг.4.2.3

От времевата характеристика на тока в електромагнита (фиг.4.2.3) се вижда, че токовият импулс е с бързо нарастващ фронт и сравнително бавно спадащо плато при избрания коефициент на запълване на управляващите импулси. Токът създава в сепаратора мощно електромагнитно поле за придърпване на частиците, но това е съпътствано и със силното им намагнитване. Хипотезата е, че затихващият колебателен процес, който се развива в края на токовия импулс води до тяхното размагнитване.

Максималните стойности на напрежението на изводите на кондензатора C_1 са високи и достигат 14 kV, което следва да се отчита при неговия избор. Напрежението емитер-колектор приложено на транзисторите също е много високо. То всъщност е в пряка зависимост от напрежението върху кондензатора. Това е главният недостатък на предложената схемата. Напрежението върху кондензатора и транзисторите намалява, ако честотата на колебанията е по-ниска, защото тогава кондензаторът е с по-голям капацитет. Освен това напрежението зависи и от запасената енергия в индуктивния елемент. Както е известно тя определя правопрпорционално от индуктивността и квадратично от тока. Тук могат да се търсят резерви за намаляване на напрежението. Може да се определи оптимално малка стойност на тока през електромагнита при започване на колебателния процес. Като се има предвид, че той се развива в края на токовия импулс, когато вече магнитните частици са близо до полюсите и не е нужен много голям ток, този подход може да се окаже перспективен.

4.2.2 Практическа реализация и опитно изследване на схемата.

При симулацията на електронния комутатор се вижда, че в резултат на колебателния процес при честота на колебанията 100Hz се получават много високи стойности на напреженията върху елементите в трептящия кръг, а също така и върху транзисторите и диода.

С цел осигуряване на по-благоприятни условия за елементите при практическото изпълнение на експерименталната схема, която следва да потвърди теоретичните изчисления, се провежда експеримент при по-ниска честота и по-малък начален ток на колебателния процес, което осигурява по-ниски стойности на напреженията върху елементите. Само за сравнение на резултатите от експеримента се симулира модел със същите параметри.

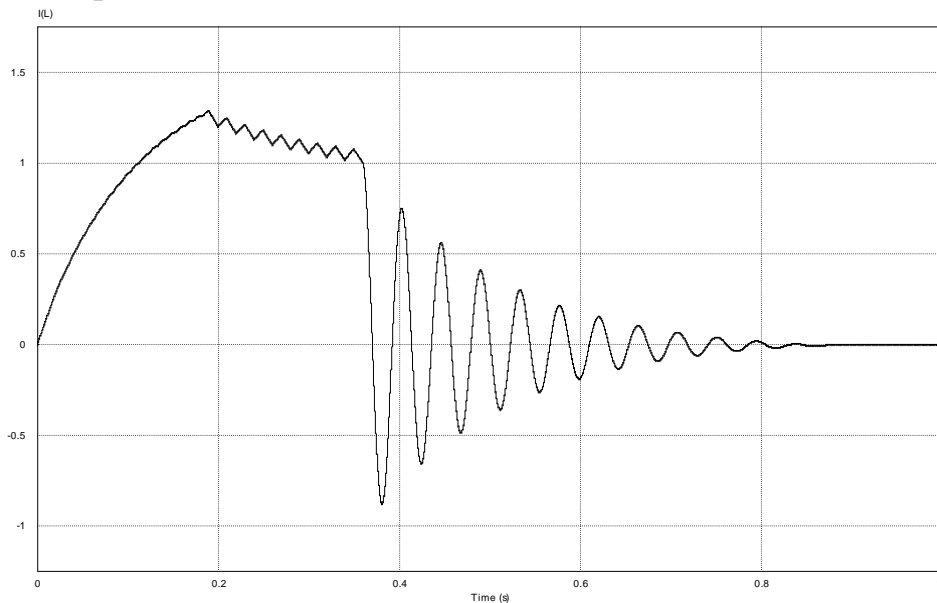
Задава се честота между 20Hz и 30Hz при която се реализира практически изпълнима схема.

За 20Hz намира стойността на кондензатора C_1 по формула (2.24), $C_1=26\mu F$. Приема се стандартна стойност за кондензатора $C_1 = 20\mu F$.

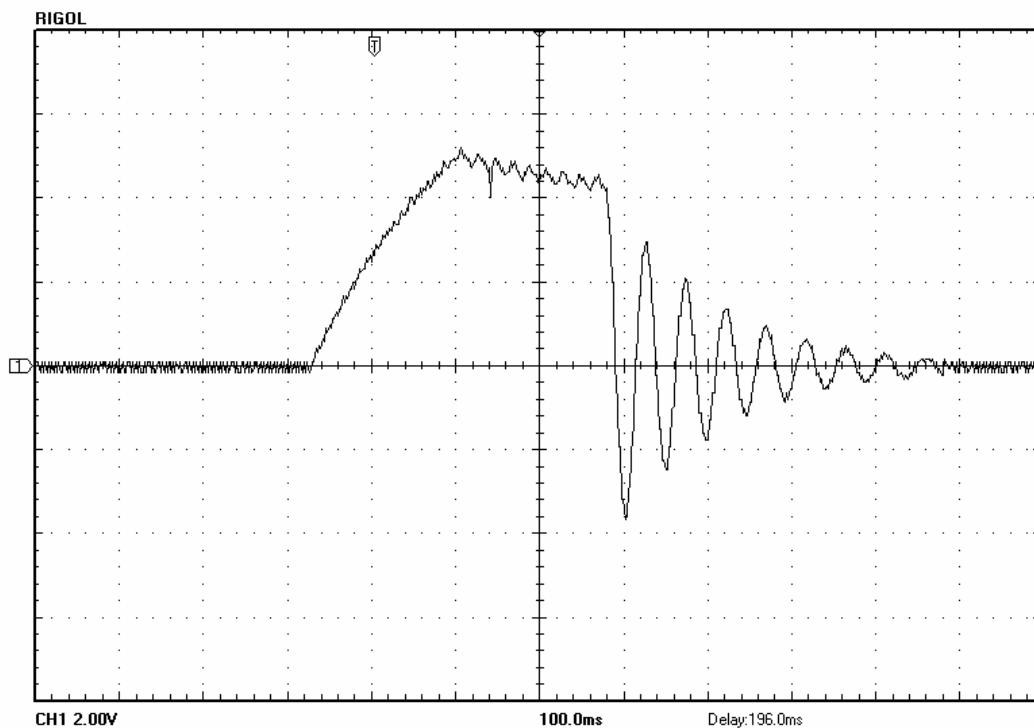
Задават се стойности на тока в бобината $I_0=1A$ до $I_m(t)=0,1A$ и при известните параметри на електромагнита ($R_1=10,6\Omega$, $L=2,4H$) се намира стойността на допълнителното съпротивление R_2 по формула (2.23).

Симулацията се осъществява при вторично напрежение на мрежовия трансформатор $U_2=36V$.

Времовата характеристика на токовете импулси е снета с осцилоскоп и е представена на фиг.4.2.7.

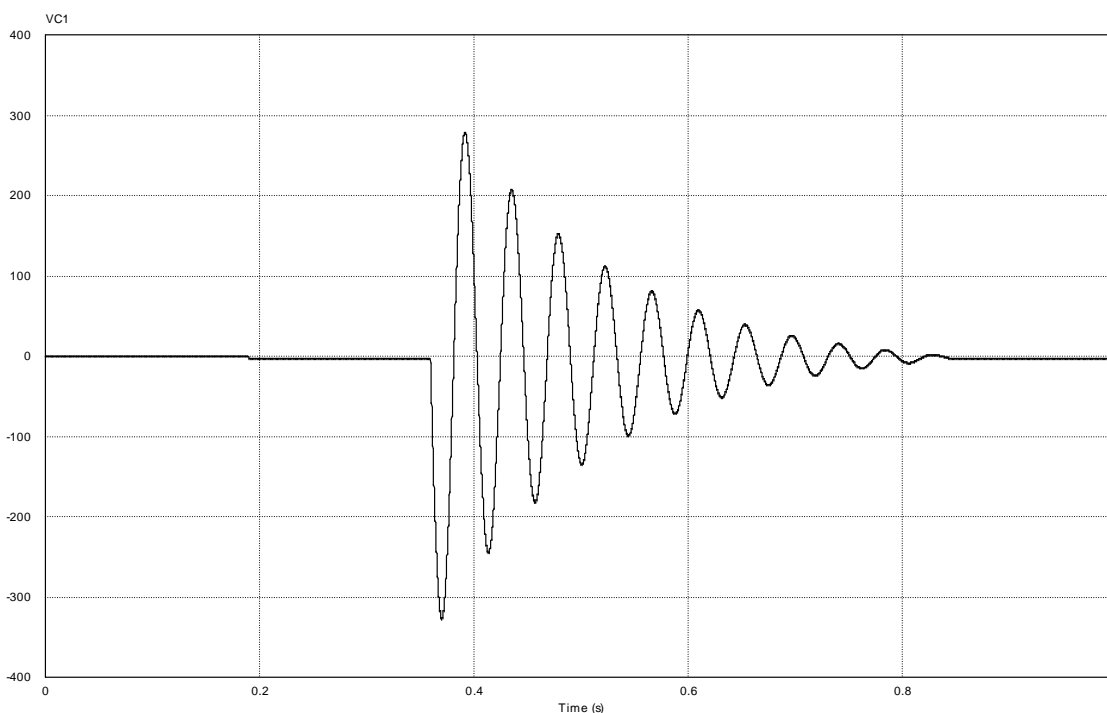


фиг.4.2.6

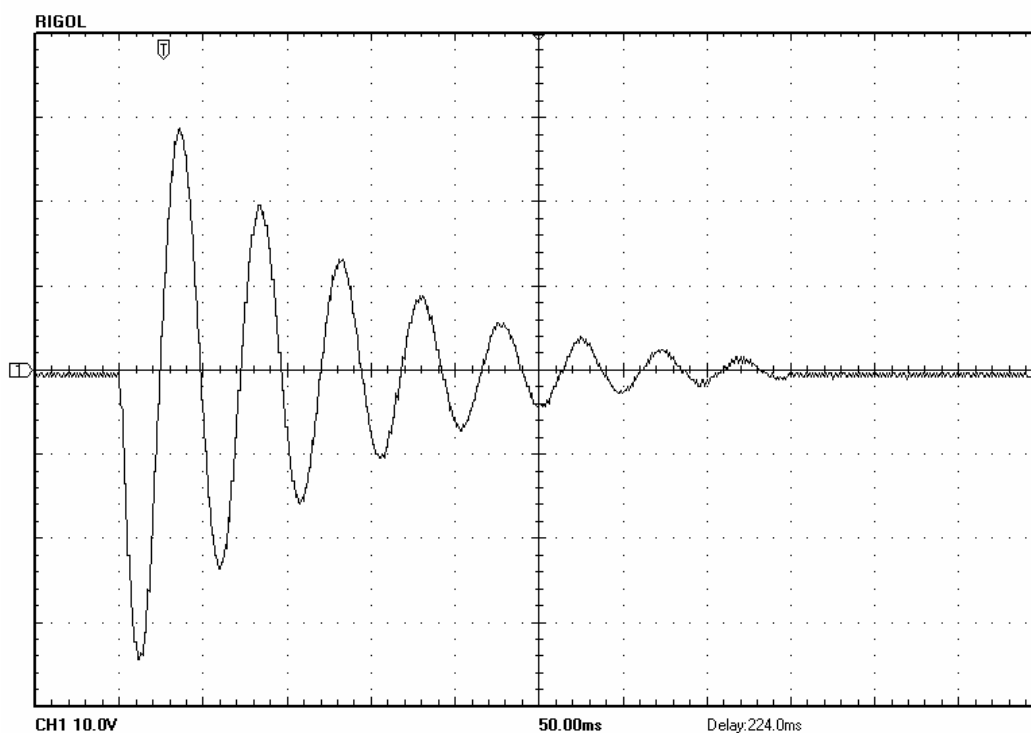


фиг.4.2.7.

Наблюдава се почти пълна идентичност на формата и параметрите на токовете импулси от реалната схема с тези на симулираната характеристика (фиг.4.2.6).



фиг.4.2.8



фиг.4.2.9.

За съпоставка са представени и фигури показващи напрежението върху кондензатора в симулационния модел (фиг.4.2.8) и опитната постановка (фиг.4.2.9).

От изложеното тук може да се направи извода, че опитно получените резултати от изследването на реализираната схема отговарят на теоретичната постановка. Това се дължи на обстоятелството, че се работи при ниски стойности на тока в практически линейни условия.

В заключение на Глава IV, в резултат от проведените експериментални и симулационни изследвания, могат да се формулират следните

ИЗВОДИ:

1. Симулационните резултати в областта на работните токове получени с FEMM с достатъчна точност съвпадат с експерименталните резултати, получени при изследването на физическия модел.

2. Анализът на резултатите, получени с FEMM позволява да се проектира магнитен сепаратор с оптимизирани параметри по отношение на геометричните размери на магнитопровода на електромагнита в съответствие с феромагнитните характеристики на електротехническата стомана и на взаимното разположение на електромагнитите.

3. Симулационния анализ на управляващото устройство с допълнителен размагнитващ ефект и с технологично обосновани параметри **потвърждава теоретичните изводи в Глава II.**

4. При зададени максимални гранични условия на силата на работния ток и на честотата на колебанията се получават високи стойности на напреженията върху елементите на схемата.

5. При определени технологични условия, изискващи по малка начална, за колебателния процес, стойност на работния ток и по-ниска честота на колебанията, напрежението върху елементите на схемата влиза в допустимите, за широко разпространената елементна база, граници.

6. Чрез експериментален анализ на прототип на управляващо устройство с допълнителен размагнитващ ефект със занижени параметри е установена работоспособността на оригиналната схема.

НАУЧНИ И НАУЧНО-ПРИЛОЖНИ ПРИНОСИ

Научните и научно–приложни приноси на дисертационния труд могат да се обобщят по следният начин:

НАУЧНИ ПРИНОСИ

1. Предложено е, енергията запасена в електромагнитната система при намагнитването на обработваното вещество, след това да се използва за размагнитването му.

2. Разработен е вариант на метода за аналитична апроксимация, позволяващ да се получи аналитично решение на нелинейното уравнение, при който апроксимиращата функция не се изразява директно, а се представя параметрично. В това аналитично решение влиянието на всеки изходен параметър върху развитието на процеса е точно дефинирано.

НАУЧНО-ПРИЛОЖНИ ПРИНОСИ

1. От автора е предложена и разработена оригинална схема за управление с допълнителна размагнитваща функция на магнитното поле в работната зона на сепараторите. Съставен е математичен модел на схемата и на тази основа теоретично са изведени необходимите зависимости за оразмеряването и, в съответствие с технологичните изисквания на магнитното сепариране.

2. За пръв път се предлага използването на асиметричен полумостов импулсен преобразувател за управлението на магнитните сепаратори. Теоретично са изведени математичните изрази, описващи динамиката на процесите в характерните етапи на работата му. Чрез симулационен анализ и на практика е доказана неговата работоспособност за целите на магнитното сепариране.

3. Разработена е обща методика за целите на проектирането и конструирането на магнитни сепаратори с импулсно управление на магнитното поле, въз основа на оригиналната нелинейна апроксимация.

4. Разработен е и експериментиран физичен модел на полупромишлен магнитен сепаратор, обзаведен с практически изпълнен, от автора, управляващ асиметричен полумостов импулсен преобразувател, в последствие развит до мостов преобразувател. Доказана е работоспособността му.

5. Експериментално са получени Вебер-амперните характеристики в магнитопровода и в работната зона на сепаратора, чрез използване на класически метод за измерване, съчетан с използването на съвременни средства за снемане и обработка на информация.

6. Обоснована е перспективността на предложената оригинална схема за управление с размагнитваща функция за повишаване ефективността на технологичния процес – магнитна сепарация, чрез изследване на реален прототип и на симулационния му модел.

ПУБЛИКАЦИИ НА АВТОРА ПО ДИСЕРТАЦИЯТА

1. Александров, Р., К. Тричков, Изследване на схема с повишено бързодействие за електромагнитна сепарация с импулсно магнитно поле. Годишник на МГУ “Св. Иван Рилски” том 52 свитък III, София, 2009.

2. Александров, Р., Изследване на импулсен преобразувател за електромагнитна сепарация. JOHN ATANASOFF SOCIETY OF AUTOMATICS AND INFORMATICS International Conference AUTOMATICS AND INFORMATICS '11, CD: ISSN1313-1869, Sofia 2011.

3. Александров, Р., Електрически параметри на силов преобразувател за магнитен сепаратор с размагнитваща функция. Годишник на МГУ “Св. Иван Рилски” том 54 свитък III, София, 2011.