



ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ - СОФИЯ

Електротехнически факултет

Катедра „Електроснабдяване, електрообзавеждане и електротранспорт”

маг. инж. Ангел Стоянов Петлешков

**МАГНИТНО-ТЕХНОЛОГИЧНИ ПРИСПОСОБЛЕНИЯ
С ЕЛЕКТРОИМПУЛСНО УПРАВЛЕНИЕ**

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

на дисертация за придобиване на образователна и научна степен
„ДОКТОР”

Област: 5. Технически науки

Професионално направление: 5.2. Електротехника, електроника и автоматика

Научна специалност: Електроснабдяване и електрообзавеждане на
промишлеността

Научни ръководители:

проф. д-р инж. Цанчо Борисов Цанев

доц. д-р инж. Светлана Георгиева Цветкова

СОФИЯ, 2018

Дисертационният труд е обсъден и насрочен за защита от Разширен катедрен съвет на катедра „Електроснабдяване, електрообзавеждане и електротранспорт” към Електротехнически факултет на Технически университет – София, проведен на 26.11.2018 г.

Публичната защита на дисертационния труд ще се състои на 11.03.2019 г. от 13.00 часа в Конферентната зала на БИЦ на Технически университет – София на открито заседание на научно жури, определено със Заповед №ОЖ-5.2-27 от 03.12.2018 г. на Ректора на ТУ-София в състав:

1. Доц. д-р инж. Николай Матанов – председател
2. Проф. д-р инж. Стоян Стоянов – научен секретар
3. Проф. д-р инж. Цанчо Цанев
4. Проф. д-р инж. Георги Павлов
5. Доц. д-р инж. Свилен Рачев

Рецензенти:

1. Проф. д-р Стоян Стоянов
2. Проф. д-р инж. Георги Павлов

Материалите по защитата са на разположение на интересуващите се в канцеларията на Електротехнически факултет при Технически университет – София, блок 12, кабинет 12222.

Дисертантът е докторант на самостоятелна подготовка към катедра „Електроснабдяване, електрообзавеждане и електротранспорт” на Електротехнически факултет. Изследванията по дисертационната разработка са направени от автора, като някои от тях са подкрепени от научноизследователски проекти.

Автор: маг. инж. Ангел Петлешков

Заглавие: Магнитно-технологични приспособления с електроимпулсно управление

Тираж: 30 бр.

Отпечатано в ИПК на Технически университет – София

I. ОБЩА ХАРАКТЕРИСТИКА НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

Актуалност на проблема

Технологичните приспособления, при които за закрепване и манипулиране на феромагнитни обекти се използва енергията на магнитното поле, са се утвърдили в световната практика като особено прогресивни и перспективни. През последните години тези приспособления непрекъснато се развиват и усъвършенстват, а областта им на използване непрекъснато се разширява.

Изключително широката област на приложение на магнитно-технологичните приспособления (МТП) се определя от съществените им предимства спрямо механичните и електромеханичните технологични приспособления, а именно: простота на конструкцията и технология за обработване; постига се висока точност и производителност при изпълнение на технологичните операции; съкращава се броят на ръчните операции и се създават условия за автоматизация на технологичните процеси; възможност да акумулират магнитната и електрическата енергия, което позволява да бъдат създадени независими от външното електрозахранване МТП; могат да бъдат многоместни, т.е. могат да се захващат няколко обекта едновременно; магнитната енергия може да се концентрира в необходими области, да се раздробява и да се сумира, а това позволява значително да се разширят технологичните възможности на МТП; в редица случаи при експлоатацията на МТП се създават възможности за икономия на електрическа енергия и др.

Широкото внедряване на прогресивни технологични приспособления, използващи енергията на магнитното поле, прави работата по изследването и оптимизацията им особено актуална. Поради тези причини в дисертационния труд се разглеждат основно въпроси, свързани с проектирането, изследването и експлоатацията на МТП с постоянни магнити и електроимпулсно управление.

Цел и основни задачи на дисертационния труд

Основните цели на дисертационния труд са насочени към създаване на предпоставки за усъвършенстване на МТП, разширяване на областта на приложение и подобряване на експлоатацията им. За целта е необходимо да се решат следните основни задачи:

1. Разработване на конструктивни решения на МТП, използвани в машиностроенето и разширяване на областта им на приложение.
2. Разработване на инженерни методики, алгоритми и програми за проектиране на постоянномагнитни технологични приспособления с електроимпулсно управление.
3. Разработване на системи за управление и регулиране на задържащата сила на МТП.
4. Изследване и оценка на експлоатационните характеристики на различни видове МТП.
5. Разработване на методика за изпитване на МТП.

Методи на изследване

Основните методи на работа, използвани при решаването на поставените задачи в дисертацията са: теоретичен анализ, оптимизация, експериментални изследвания, математическа статистика за обработка на резултати.

Практическа приложимост

С разработената инженерна методика и компютърна програма са проектирани и внедрени в производство магнитни маси с електроимпулсно управление от фирма „Кентавър“ и товароподемни магнити с електроимпулсно управление от завод „Подем“ и Краностроителен завод „Христо Смирненски“. Компютърната програма се използва и в учебния процес при разработването на дипломни работи, свързани с проектирането на магнитни захващащи приспособления.

Апробация

Резултатите от дисертационния труд са докладвани на международни конференции: Енергиен Форум 2004, 2005, 2006, 2007, 2008, 2010, 2015, ЕФ 2017, БулЕФ 2018 и са публикувани в Годишник на ТУ-София, Списание „Енергетика“ и Сборник доклади.

Публикации

Основните постижения и резултати от дисертационния труд са публикувани в 11 броя статии, от които 7 самостоятелни.

Структура и обем на дисертационния труд

Дисертационният труд е в обем от 148 страници, като включва увод, четири глави за решаване на формулираните основни задачи, приноси на дисертационния труд, списък на публикациите по дисертацията и използвана литература. Цитирани са общо 159 литературни източници, като 43 са на латиница и 116 на кирилица. Работата включва общо 72 фигури и 39 таблици. Номерата на фигурите и таблиците в автореферата съответстват на тези в дисертационния труд.

II. СЪДЪРЖАНИЕ НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

ГЛАВА 1. ПРОУЧВАНЕ И КРИТИЧЕН АНАЛИЗ НА ДОСТИЖЕНИЯТА В ОБЛАСТТА НА МАГНИТНО-ТЕХНОЛОГИЧНИТЕ ПРИСПОСОБЛЕНИЯ

Направената литературна справка, не включва всички публикации в областта, но дава възможност за оценка на развитието на МТП, очертаване на проблемите и формулиране на задачите на дисертационния труд. Тенденцията на развитието на МТП, изградени на базата на постоянни магнити и управлявани по електрически път, е устойчива. За МТП е от съществено значение правилното определяне на силовите им характеристики с отчитане на влиянието върху задържащата сила на голямото разнообразие от фактори – конструктивни, технологични, експлоатационни и др.

ГЛАВА 2. ПРОЕКТИРАНЕ НА ПОСТОЯННОМАГНИТНИ ТЕХНОЛОГИЧНИТЕ ПРИСПОСОБЛЕНИЯ С ЕЛЕКТРОИМПУЛСНО УПРАВЛЕНИЕ

2.1. Общи закономерности за изчисляване на магнитната система на магнитно-технологични приспособления

Магнитната система на дадено магнитно приспособление представлява съвкупността от тела и среда, през която се затваря магнитният поток, създаден

от постоянните магнити или електромагнитите. Тъй като магнитното поле може да се установи и на значително разстояние от МТП, важна особеност на изчисляването на магнитната система е определянето на обема, за който ще се отчита разпределението на магнитните потоци. Това разпределение за една елементарна П-образна магнитна система е дадено на фиг. 2.1.

Разглеждането на този вид магнитна система е оправдано, защото всяка магнитна система може да се представи като съставена от краен брой елементарни магнитни системи. При изчисляването на магнитната система

- се допуска, че потокът през детайла Φ_d и потокът през въздушната междина са равни;

- пренебрегват се магнитните потоци на разсейване, които се затварят през външните стени на МТП, поради незначителната им стойност, обусловена от голямото магнитно съпротивление за тези потоци;

- пренебрегват се магнитните съпротивления на неработните въздушни междини δ .

При изчисляването на магнитната система важно място заема определянето на силата, която реализира дадено МТП. Магнитната сила се определя като производна на магнитната енергия W_m по координатата, която се стреми да се измени

$$Q = \frac{B^2 S}{2 \mu_0}, \text{ N} \quad (2.3)$$

$$Q = \frac{\Phi^2}{2 \mu_0 S}, \text{ N} \quad (2.4)$$

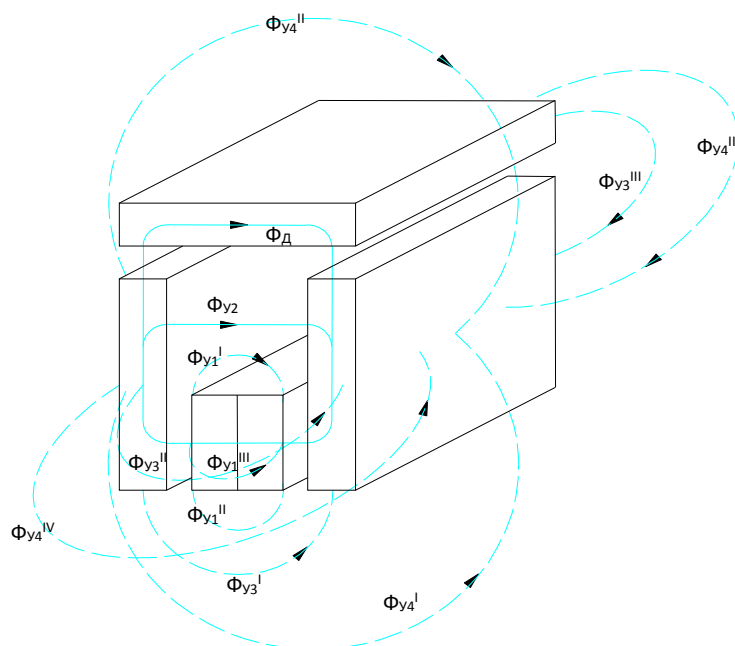
където: B е индукцията на магнитното поле, Т; S - площта на допир между полюсите на МТП и захващания детайл, m^2 ; μ_0 - магнитната проницаемост на въздуха; Φ - работния магнитен поток.

Изразът за определяне на относителната магнитна сила, реализирана от МТП за единица контактна площ със захващания детайл е

$$Q_{СП} = \frac{B^2}{2 \mu_0}, \text{ N/m}^2 \quad (2.5)$$

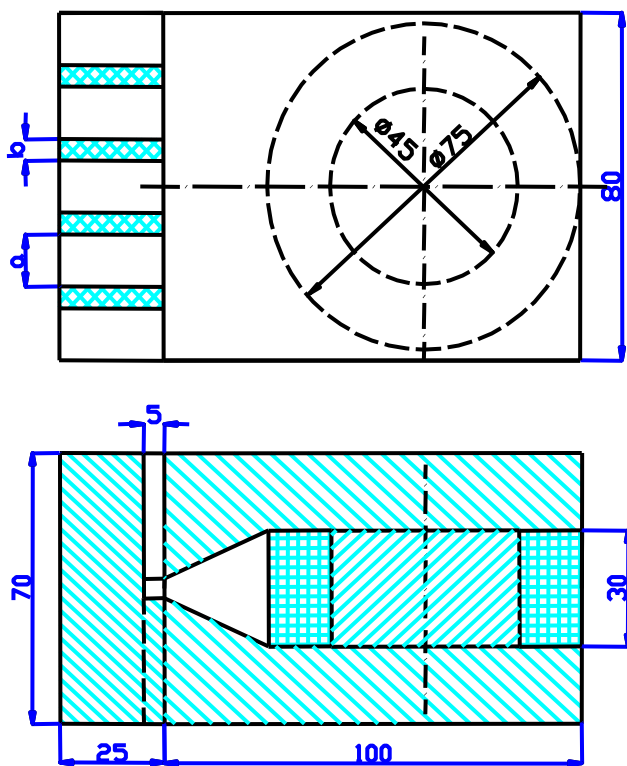
2.2. Методика за проектиране на магнитната система на МТП

Магнитната система се състои от няколко елементарни магнитни системи, ето защо може да се разглежда само една от тях (фиг. 2.2). При изчисляване на

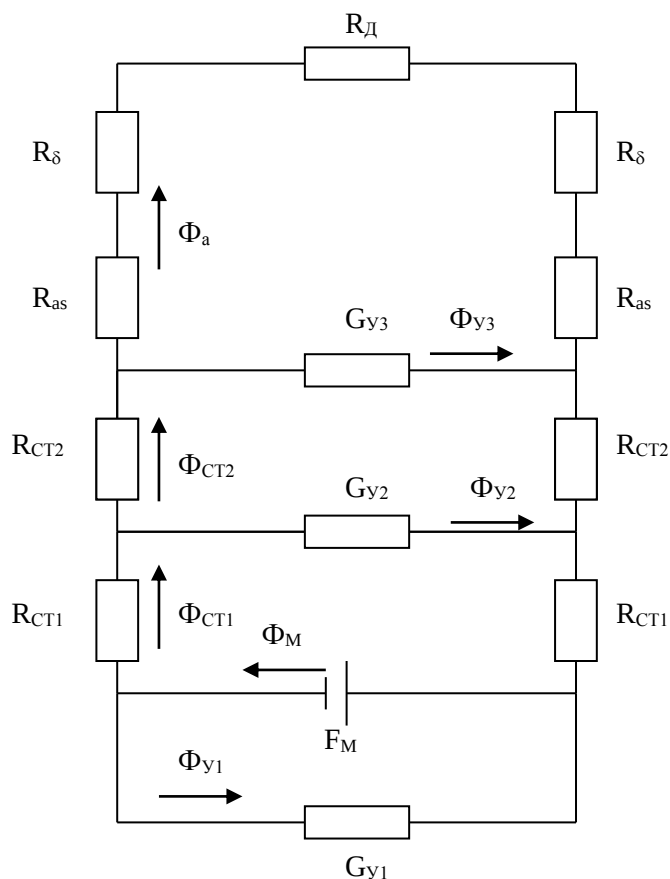


Фиг. 2.1. Магнитни потоци в елементарна П-образна магнитна система

нова магнитна конструкция, е подходящо в началния етап да се прилагат опростени методи, които са с малка точност, и едва след уточняване на основните конструктивни параметри да се пристъпи към точна, но трудоемка процедура за окончателно определяне на параметрите на устройството.



Фиг. 2.2. Елементарна магнитна система



Фиг. 2.3. Опростена електрическа схема на магнитна система

В различните методики за изчисляване на магнитни системи се правят следните допускания:

- повърхностите, образуващи работната въздушна междина, се приемат екипотенциални;
- приема се пълно намагнитване на постоянните магнети, което дава основание да се работи с основната крива на размагнитване;
- магнитният поток и магнитната индукция се осредняват по напречното сечение на магнитите и магнитопроводящите части.

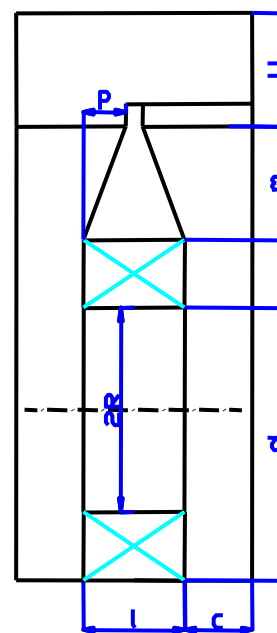
Задачата е при зададени параметри на магнита и магнитопровода да се оптимизира адаптерната плоча, така че при поставянето на детайл с определена дебелина, силата на притегляне да е максимална.

Оптимизацията се извършва на базата на формалната аналогия между електрическите и магнитните вериги. За целта на фиг. 2.3 е показана опростена електрическа схема на магнитната система от фиг. 2.2. В нея не са отразени съпротивленията на въздушните междини между магнита и магнитопровода и между магнитопровода и адаптерната плоча, защото те са много по-малки от останалите съпротивления. В схемата с G_{yi} са означени проводимостите по въз-

духа на потоците на утечка, а с R_i – съпротивления на стоманените участъци по пътя на полезния поток.

За да се намери силата на притегляне е необходимо преди това да се знае работната точка на системата върху кривата на размагнитване. Тя от своя страна зависи силно от проводимостта на системата G_0 , в определянето на която се състои трудността на задачата.

Основните размери на елементарната магнитна система са показани на фиг. 2.4. Използвани са следните означения: m - височина на участъка от магнитопровода с трапецовидно сечение; U - височина на адаптерната плоча; $d = 2R$ - дебелина на бобината; c - ширина на магнитопровода; p - разширение на магнитопровода; e - габаритния размер, който не се вижда; h - височина на детайла.



Фиг. 2.4. Основни размери

2.2.1. Изчисляване на проводимостите на утечка

Определянето на проводимостите се извършва по метода на Ротерс (метод на вероятните пътища на потока). Същността му е замената на действителното разпределение на полето с приблизително, при което потокът се разглежда като съвкупност от силови тръби с проста, но достатъчно правдоподобна форма. За всяка от приетите силови тръби на потока полето се привежда към равномерно.

2.2.2. Определяне на съпротивления на стоманените участъци

Задава се начална стойност на индукцията B_M , получена от произволно избрана работна точка върху кривата на размагнитване $B = f(H)$. За тази стойност се изчислява магнитният поток на магнита

$$\Phi_M = B_M \pi R^2 \quad (2.27)$$

Приема се, че потокът на утечка Φ_{y1} е 10% от общия поток и тогава за потока в стоманата се получава

$$\Phi_{CT1} = 0,9 \Phi_M \quad (2.28)$$

Съответната индукция ще зависи от лицето на участъка

$$S_{CT1} = c e \quad (2.29)$$

$$B_{CT1} = \frac{\Phi_{CT1}}{c e} \quad (2.30)$$

След това от функцията $B = f(H)$ се определя напрегнатостта H_{CT1} и се изчислява магнитната проницаемост

$$\mu_{CT1} = \frac{B_{CT1}}{H_{CT1}} \quad (2.31)$$

Дължината на стоманения участък от магнита до разширената част на магнитопровода, с известно приближение може да се приеме равна на $(d - R)$. Тогава за съпротивлението на стоманения участък се получава

$$R_{CT1} = \frac{d - R}{c e \mu_{CT1}} \quad (2.32)$$

По аналогичен начин се процедира за останалите стоманени участъци.

За съпротивлението на въздушната междина между адаптерната плоча и детайла се получава

$$R_{\delta} = \frac{2\delta}{\mu_0 (2c + l_M)(N-1)a} \quad (2.76)$$

2.2.3. Определяне на проводимостта на системата

За да се намери проводимостта на магнитната система въз основа на опростената електрическа схема, показана на фиг. 2.3, се изчисляват еквивалентните съпротивления

$$R_{12} = \frac{\frac{2(R_{as} + R_{\delta}) + R_D}{G_{Y3}}}{2R_{as} + 2R_{\delta} + R_D + \frac{1}{G_{Y3}}} \quad (2.77)$$

$$R_{34} = \frac{\frac{2R_{CT2} + R_{12}}{G_{Y2}}}{2R_{CT2} + R_{12} + \frac{1}{G_{Y2}}} \quad (2.78)$$

$$R_e = 2R_{CT1} + R_{34} = 2R_{CT1} + \frac{\frac{2R_{CT2} + R_{12}}{G_{Y2}}}{2R_{CT2} + R_{12} + \frac{1}{G_{Y2}}} \quad (2.79)$$

$$G_0 = \frac{1}{R_e} + G_{Y1} \quad (2.80)$$

2.2.4. Определяне на работната точка и силата на притегляне

След като е определена стойността на G_0 може да се изчисли напрегнатостта на магнита

$$H'_M = \frac{B_M \pi R^2}{l_M G_0} \quad (2.81)$$

и от зависимостта $B = f_M(H)$ да се намери B'_M .

На тези нови стойности на напрегнатостта и индукцията съответства и нова, уточнена работна точка върху размагнитващата крива.

С новата $B_M = B'_M$ се преминава към изчисляване на следващото приближение за G_0 , като за получаване на стойностите на Φ_{CT1} , Φ_{CT2} и Φ_a се използват точните формули

$$\Phi_{CT1} = \frac{\Phi_M}{R_e G_0} \quad (2.82)$$

$$\Phi_{CT2} = \Phi_{CT1} (1 - G_{Y2} R_{34}) \quad (2.83)$$

$$\Phi_a = \Phi_{CT2} (1 - G_{Y3} R_{12}) \quad (2.84)$$

Изчисленията по тези точки продължават докато се изпълнят неравенствата

$$|H_M - H'_M| \leq \varepsilon_H \quad (2.85)$$

$$|B_M - B'_M| \leq \varepsilon_B \quad (2.86)$$

където $\varepsilon_H = 1000 \text{ A/m}$ и $\varepsilon_B = 0,01 \text{ T}$ са зададени точности за определяне на H_M и B_M .

При изпълнение на условията (2.85) и (2.86) се гарантира, че работната точка върху кривата на размагнитване $B = f_M(H)$ е избрана правилно и съответната индукция B_M отговаря на действителната, която би се получила след отчитане на всички потоци на разсейване. В резултат получената от последната операция стойност на Φ_a съответства на действителната стойност на потока в работната междина и може да бъде използвана за изчисляване на силата на задържане

$$F = \frac{\Phi_a^2}{\mu_0 (N-1) a e (2c + l_M)^2} \quad (2.87)$$

Процедурата за определяне на работните точки върху характеристиката на магнита е сходимата при произволни начални стойности на индукцията B_M и изпълнението на (2.85) и (2.86) обикновено се постига за около 5-10 итерации.

Разработените методика и алгоритъм за изчисляване на Φ_a и съответно на F при зададени стойности на a и b може да бъдат използвани като основна процедура при търсене на максимума на силата F по стойностите на a и b .

По същество задачата за търсене на максимума на силата на задържане е нелинейна оптимизационна задача с целева функция (2.87) и ограничения, които произтичат от конструктивни изисквания към ширината на полюса a и междуполусното разстояние b

$$a_{min} \leq a \leq a_{max} \quad (2.88)$$

$$b_{min} \leq b \leq b_{max} \quad (2.89)$$

Не е известно дали (2.87) е унимодална или е многоекстремална функция на променливите a и b . Освен това тя не може да бъде представена в аналитичен вид като функция на a и b и следователно не могат да бъдат получени в аналитичен вид частните производни на силата. Тези особености на (2.87) обуславят избора на метод за оптимизация, който би могъл да се използва за търсене на максимума на (2.87) при ограничения (2.85) и (2.86). Преди всичко този метод трябва да използва движение към екстремума само на стойността на целевата функция, но не и на нейните производни, защото изчисляването на производните от диференчни зависимости при използване на градиентен метод много бързо води до натрупване на големи грешки. Освен това той трябва да има достатъчно добра сходимост към глобалния екстремум на целевата функция.

За намиране на максимума на (2.87) при ограничения (2.85) и (2.86) биха могли да се препоръчат методите на Нелдер и Мид или методът на случайното търсене. Отчитането на ограниченията за a и b може да се извършва автоматично, като ако някоя поредна стойност на a и b се окаже извън съответния интервал, определен от (2.88) и (2.89), тя се приравнява на тази граница на интервала, от чиято страна се намира.

Предложените по-горе методи за оптимизация на функции от общ вид не се използват тук по следните съображения:

- Конструктивните и технологичните изисквания при проектирането на адаптерната плоча налага да се избират дискретни стойности на променливите a и b , т.е. те не могат да приемат всички възможни стойности, а само конкретни дискретни стойности (изразяващи се в цяло число милиметри).
- Освен това броят на полюсите

$$N = \frac{e + b}{a + b} \quad (2.90)$$

трябва да бъде цяло число, защото дължината на масата e е зададена.

В резултат на ограниченията задачата се отнася към дискретното нелинейно програмиране. Проведените експерименти показват, че решението ѝ чрез пълно изследване на всички възможни дискретни стойности на a и b , за които (2.90) е цяло число, е по-точно и се получава за няколкократно по-малко време, отколкото решението, получено с общите методи на Нелдер и Мид или на случайното търсене. В разработения алгоритъм се изчисляват стойностите на силите F за всички комбинации от дискретни стойности на a и b , за които

$$\frac{e + b}{a + b} = \left| \frac{e + b}{a + b} \right|, \quad (2.91)$$

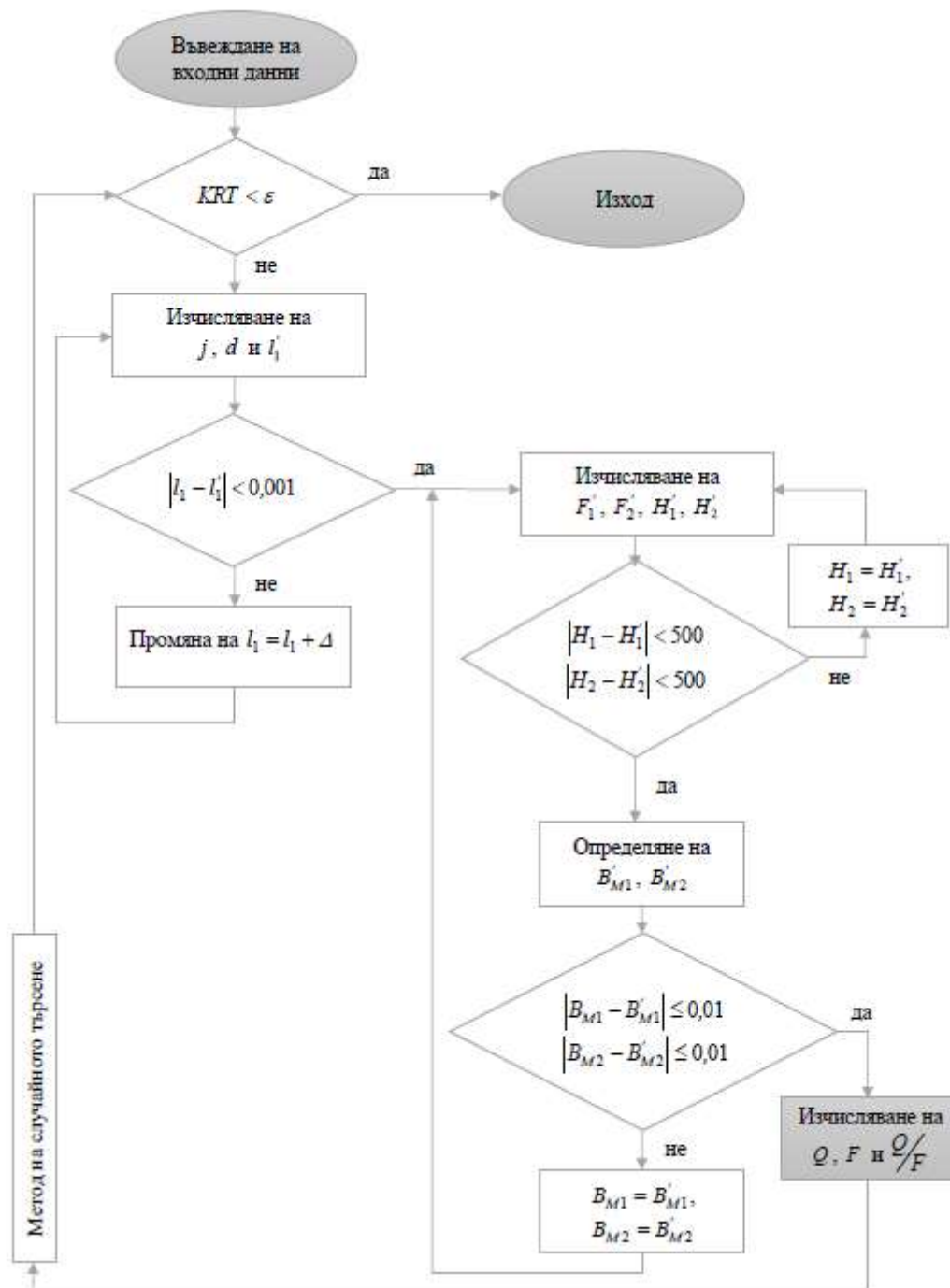
където под $| \cdot |$ се разбира модулът на израза. Ако се променя дебелината на детайла h , могат да се получат оптимални стойности на a и b , при които съответната сила F е максимална.

2.3. Алгоритъм и програма за проектиране на МТП

МТП могат да бъдат сложни по конструкция, което затруднява тяхното изчисляване, като цяло. За да се облекчи процеса на проектиране, магнитната система се разглежда като съставена от множество елементарни магнитни системи, които са част от цялата и се повтарят в нея няколко пъти.

При допускане за постоянност на магнитните потоци и пренебрегване на някои незначителни потоци на утечките, се разглежда елементарна магнитна система включваща два правоъгълни постоянни лети магнита, поставени върху стоманени магнитопроводи, които отвеждат магнитния поток към работната междина. Върху магнитите са поставени бобини, които служат за намагнитване и пренамагнитване на магнитите. Необходимата магнитодвижеща сила на бобините трябва да бъде определена така, че да се постигне насищане на постоянните магнити. На основата на това условие може да бъде формулирана и първата задача на проектирането – изчисляване на необходимата м.д.с. на бобините, както и на техните електрически и конструктивни параметри. След това може да се пристъпи към решаване на задачата за проектиране на магнитната система с постоянни магнити.

На фиг. 2.15 е показана обобщената блок-схема на алгоритъма.



Фиг. 2.15. Обобщена блок-схема на алгоритъма

Силата на задържане се определя с

$$F = 8,12 B_{\delta}^2 b_M \left(a_{CT} - \frac{d_p}{tg\alpha} \right) 10^4, \text{ kg} \quad (2.98)$$

Теглото на приспособлението е

$$Q = 2 \left[l_M a_M b_M \sigma_M + a_{CT} b_{CT} (l_1 + l_2 + 2a_{CT}) \sigma_{CT} + \left(\frac{d_p}{tg\alpha} + 2a_{CT} \right) 0,5 d_p b_{CT} \sigma_{CT} + 2 w l_{CP} \frac{\pi d^2}{4} \sigma_{мед} 10^{-6} \right] \quad (2.99)$$

където: σ_M е специфично тегло на магнитите; σ_{CT} - специфично тегло на стоманата; $\sigma_{мед}$ - специфично тегло на медта.

Задачата за проектиране на оптимална магнитна система се формулира като задача на нелинейното програмиране по следния начин:

Да се минимизира функцията

$$f = \frac{Q}{F}, \quad (2.100)$$

при ограничения:

$$l_{M \min} \leq l_M \leq l_{M \max} \quad (2.101)$$

$$a_{M \min} \leq a_M \leq a_{M \max} \quad (2.102)$$

$$a_{CT \min} \leq a_{CT} \leq a_{CT \max} \quad (2.103)$$

$$\operatorname{tg} \alpha_{\min} \leq \operatorname{tg} \alpha \leq \operatorname{tg} \alpha_{\max} \quad (2.104)$$

На основата на представеният алгоритъм е разработена компютърна програма. Програмата дава възможност за автоматизиране на процеса на проектиране на магнитни захващащи приспособления с постоянни магнити и определяне на оптималните им параметри за всеки конкретен случай. Целта е да се облекчи работата на проектантите и подобри качеството на тези изделия.

С помощта на разработената компютърна програма са проектирани магнитни захващащи приспособления за машиностроенето: автономни товароподемни магнити с товароподемност 1000 kg и 1500 kg; магнитно захващащо приспособление за фреза с товароподемност 1000 kg; магнитно захващащо приспособление за робот с товароподемност 100 kg; гама магнитни маси и др. Програмата се използва и в учебния процес при разработването на дипломни работи, свързани с проектирането на магнитни захващащи приспособления.

2.4. Изводи към ВТОРА ГЛАВА

1. Разработена е инженерна методика за проектиране на магнитната система на МТП.

2. Избран е метод за решаване на оптимизационната задача - методът на случайното търсене. Методът е прост, има сравнително висока вероятност за сходимост към глобалния екстремум на изследваната функция и използва за движение към екстремума само стойността на изследваната функция. Изборът на подходящ метод за оптимизиране измежду множеството известни методи трябва да се прави с отчитане на конкретните условия на решаваната задача.

3. За автоматизиране на процеса на проектиране на МТП с постоянни магнити и определяне на оптималните им параметри за всеки конкретен случай, на основата на предложената методика са разработени алгоритъм и компютърна програма.

4. Чрез разработената инженерна методика и компютърна програма са проектирани и внедрени в производство магнитни маси с електроимпулсно управление от фирма „Кентавър“ и товароподемни магнити с електроимпулсно управление от завод „Подем“ и Краностроителен завод „Христо Смирненски“.

5. Компютърната програма се използва и в учебния процес при разработването на дипломни работи, свързани с проектирането на магнитни

захващащи приспособления.

6. Направените изследвания показват, че използването на програмата в проектантската дейност води до значително подобряване на качеството на магнитните захващащи приспособления. При оптимизация на теглото на системата и силата чрез разработената методика и програма, силата на задържане се увеличава с повече от 20% в сравнение с методики за проектиране без оптимизация.

ГЛАВА 3. ЕЛЕКТРИЧЕСКО УПРАВЛЕНИЕ НА МАГНИТНО-ТЕХНОЛОГИЧНИ ПРИСПОСОБЛЕНИЯ

3.2. Импулсно управление на МТП

Както е известно, процесът на намагнитване на феромагнитния материал представлява изменение на намагнитеността на веществото под действие на външно магнитно поле. Достатъчна за насищането се счита такава стойност на напрегнатостта на намагнитващото поле H_{max} , намаляването на която с 25% да не води до намаляване на остатъчната индукция $B_{ост}$ и коерцитивната сила H_C . За достигане на максимална ефективност на действието на постоянния магнит е необходимо намагнитването да се извършва след като е събрана цялата магнитна система, при минимална въздушна междина.

За намагнитване на постоянни магнити може да се използва както източник на постоянно магнитно поле, така и източник на импулсно магнитно поле. Импулсните методи са най-перспективни. При избор на продължителността на импулса на намагнитващото поле трябва да се отчитат и вихровите токове, създаващи собствено поле, възпрепятстващо проникването в дълбочина на материала на намагнитващото външно поле.

3.2.1. Определяне на продължителността на импулса на намагнитване

Продължителността на импулса се определя с

$$t = \int_0^t dt = \int_0^{\Phi_0} w \frac{d\Phi}{U_0 - i R} = w \int_0^{\Phi_0} \frac{d\Phi}{U_0 - i R} \quad (3.5)$$

При изчисленията се пренебрегва влиянието на вихровите токове и пулсациите на постоянния ток върху времето за намагнитване.

Проведените изследвания показват, че тези фактори увеличават времето за намагнитване с около 20%. Така изчислената стойност представлява продължителността на първия участък от кривата на токовия импулс. Вторият участък на импулса е необходим за да се гарантира достигане на установената стойност на тока при евентуално колебание в режима на работата на управляващото устройство, мрежовото напрежение и др. Практиката показва, че този участък трябва да бъде с продължителност 0,02 – 0,03 s. Третият участък включва времето за затихване на предходния процес при изключване на хранящото напрежение. Времетраенето на този участък не се включва към продължителността на управляващия импулс, който трябва да осигурява схемата за управление, т.е.

$$t_{нам} = t^I + t^{II} . \quad (3.6)$$

Загубите на енергия при пренамагнитване са по-големи от загубите при

намагнитване. Следователно времето за пренамагнитване също ще бъде по-голямо. Направените изследвания показват, че то трябва да се увеличи с около 35% в сравнение с времето на намагнитване, т.е.

$$t_{\text{пренам}} = 1,35 t_{\text{нам}}. \quad (3.7)$$

Продължителността на намагнитващия импулс се определя с решаването на сложна задача. Приблизително може да се изчисли по формулата:

$$\Delta t = 6,4 \sigma \frac{B}{H} D^2 \cdot 10^{-9}, \text{ s} \quad (3.8)$$

където: B е магнитната индукция, Т; H - напрегнатост на външното магнитно поле, kA/m; σ - специфична проводимост на материала, S/m; D - ефективен диаметър на магнита, m.

Често се използва комбинирано намагнитване, като импулсното магнитно поле с напрегнатост H_{max} се наслагва към стационарното с напрегнатост H_0 , създавано от постоянен ток. Ефективността на този начин се състои в това, че част от общото намагнитващо поле се създава от постоянен ток, в резултат на който се намалява напрегнатостта на импулсното поле, а това в крайна сметка води до намаляване на мощността и габаритите на цялото намагнитващо устройство. При това може да се изключи частичното размагнитване, предизвикано от възникването на обратна полуваля на разрядния ток.

Интерес представлява методът за намаляване на намагнитеността и размагнитване в условията, при които се наблюдава обратимо намаляване на коерцитивната сила на магнитнотвърдия материал. Едно от условията е нагриването на висококоерцитивните материали. Напрегнатостта на коерцитивната сила на бариерен ферит в областта на точката на Кюри (450°C) се намалява до 100-150 A/m и за тяхното намагнитване до насищане е достатъчно въздействието на магнитно поле с напрегнатост до 500 A/m, което е 15 пъти по-малко спрямо това при нормална температура.

Ефективността на този метод е очевидна, ако се вземе под внимание, че в последните години все по-широко се прилагат магнити от висококоерцитивни материали на основата на съединения на редкоземни елементи с кобалт. Коерцитивната сила достига 1600-2000 kA/m, а напрегнатостта на полето, необходимо за намагнитване до насищане - 10000 kA/m. Използването за тази цел на електромагнити и даже на най-ефективни свръхпроводящи солениоди е затруднено и изисква създаване на сложни и скъпи уредби.

3.2.2. Импулсно намагнитване на постоянни магнити

Широкото използване на МТП с постоянни магнити изисква разработването на по-ефективни методи за намагнитване. Един от най-разпространените методи е импулсното намагнитване, чието предимство е възможността за създаване на сравнително компактни устройства, които бързо намагнитват системи със сложна конфигурация на магнитната верига.

Разглежда се импулсното намагнитване на разпространените в МТП постоянни магнити с кръгло и правоъгълно сечение, поставени в еднородно импулсно магнитно поле на намагнитващата уредба. Арматурата не е включена, тъй като нейните размери и конфигурация за всяко МТП са различни. Разработения метод може да бъде прилаган при всякаква форма на импулса.

Разглежда се импулс във вид на полуълна от синусоида, който най-често се използва в импулсните устройства.

Електромагнитните процеси вътре в магнита се описват с уравненията:

- за цилиндричен магнит

$$\frac{\partial^2 H}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial H}{\partial r} = \sigma \frac{\partial B}{\partial t} \quad (3.9)$$

- за призматичен магнит с правоъгълно сечение

$$\frac{\partial^2 H}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 H}{\partial y^2} = \sigma \frac{\partial B}{\partial t} \quad (3.10)$$

където σ е относителната проводимост на материала на магнита.

Напрегнатостта на полето на повърхността на магнита се представя във функция от времето:

$$H_{\text{пов}} = \begin{cases} H(t) = H_m \sin\left(\frac{t}{T} \pi\right), & 0 \leq t \leq T \\ 0, & t > T \end{cases} \quad (3.11)$$

където T е продължителността на намагнитващия импулс.

За оста на магнитите трябва да е изпълнено условието:

- за цилиндричен магнит

$$\left. \frac{\partial H}{\partial r} \right|_{r=0} = 0 \quad (3.12)$$

- за призматичен магнит

$$\left. \frac{\partial H}{\partial x} \right|_{x=0} = 0 \quad \text{и} \quad \left. \frac{\partial H}{\partial y} \right|_{y=0} = 0 \quad (3.13)$$

Задачата се разглежда за размагнитен материал, т.е. при $t = 0$.

$$H|_{t=0} = 0 \quad B|_{t=0} = 0 \quad (3.14)$$

Връзката между магнитната индукция и напрегнатостта на полето се определя от хистерезисната крива за дадения материал. Използването на аналитични методи за решаване на тази задача се усложнява поради трудното математично описание на нелинейните свойства на средата.

За получаване на универсални резултати изчисленията се извършват в относителни единици. За базисни стойности на напрегнатостта на полето, магнитната индукция и времето, са избрани коерцитивната сила H_C , остатъчната индукция B_r и продължителността на намагнитващия импулс T . Базисна стойност за линейните размери е диаметърът D за цилиндрични магнити и размера на голямата страна D (паралелна на оста X) за призматичните магнити

$$h = \frac{H}{H_C} \quad b = \frac{B}{B_r} \quad \tau = \frac{t}{T} \quad r^* = \frac{r}{\frac{D}{2}} \quad x^* = \frac{x}{\frac{D}{2}} \quad y^* = \frac{y}{\frac{D}{2}} \quad (3.15)$$

Връзката на тези величини се отчита с обобщения параметър g

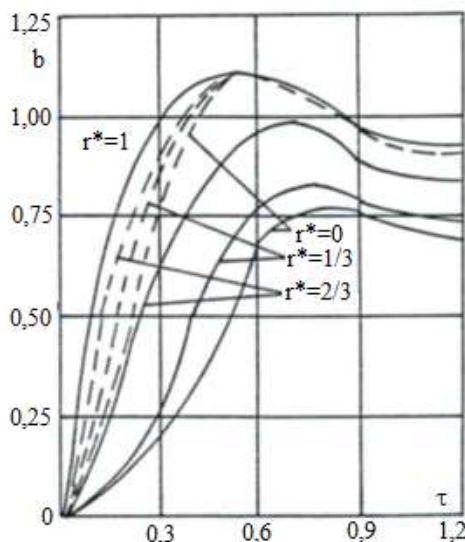
$$g = \sigma \frac{B_r}{H_C} \frac{D^2}{4} = \frac{\mu_0 \sigma R^2}{T} \quad (3.16)$$

който е като критерий за подобие между процесите, извършващи се при намагнитването на магнитите.

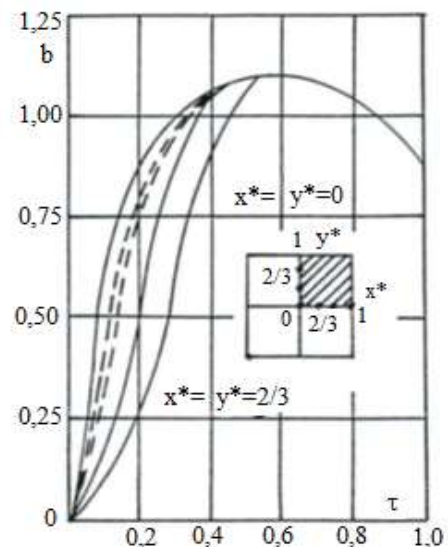
Въвеждането на параметъра g позволява да се получат универсални зависимости за съпоставяне условията на импулсно намагнитване на различни магнити.

Материалът напълно се намагнитва при постоянна напрегнатост на полето само при малко g ($g \leq 0,03$), т.е. при голяма продължителност на импулса. При нарастване на g даже до 0,1 остатъчната индукция на оста на цилиндъра се оказва почти с 20% по-малка спрямо тази на повърхността, при което и значителното повишаване на напрегнатостта на полето не води до увеличаване на намагнитеността, поради влиянието на вихровите токове. Аналогична картина се наблюдава и за призматичен магнит с квадратно или правоъгълно сечение.

На фиг. 3.4 е показана, в относителни единици, зависимостта на изменението на индукцията $b(\tau)$ при $\frac{H_{max}}{H_C} = 2$ по време на действието на импулса τ . На фигурата $b(\tau)$ е показана с плътна линия за $d = 2,5$, а с прекъсната линия – за $d = 0,63$ при $a_M = 2$. На практика се оказва, че тя е еднаква за магнити с правоъгълно сечение и различно отношение на страните. В този случай големината на R във формулата за g се приема равна на половината дължина на диагонала на напречното сечение.



Фиг. 3.4. Зависимост $b(\tau)$ в относителни единици



Фиг. 3.5. Изменение на $b(\tau)$ за призматични магнити с квадратно и правоъгълно сечение

На фиг. 3.5 зависимостта $b(\tau)$ е показана, в относителни единици, за различна дълбочина на призматични магнити с квадратно и правоъгълно сечение с еднаква площ ($h_m = 2$; — - $p=1$, $g = 0,5$; - - - - $p=16$, $g=2$). Влиянието на вихровите токове в магнити с квадратно сечение ($D/C = 1$) се

оказва още по-силно спрямо магнити с правоъгълно сечение със същата площ и отношение на страните $D/C = 16$.

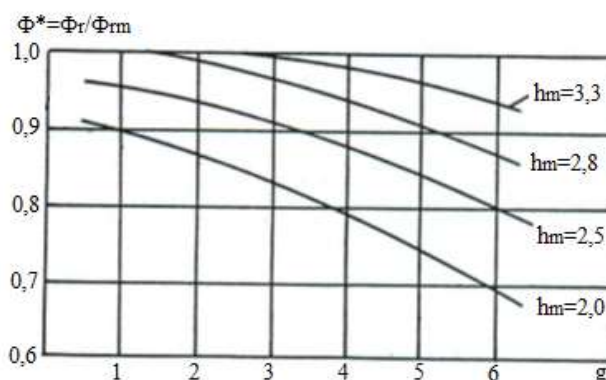
Изборът на параметри за намагнитващия импулс на цилиндричен и призматичен магнит от КОНИАЛ може да се осъществи по графиката дадена на фиг. 3.6. Тя показва зависимостта на отношението на остатъчния магнитен поток Φ_r към пределно възможния остатъчен поток $\Phi_{rm} = B_r S$.

Графиката, показваща зависимостта на магнитния поток от g в магнит с кръгло, правоъгълно и квадратно сечение в момента на завършване на импулса е показана на фиг. 3.7. Показаните криви имат следните означения: — - цилиндър; - . - - квадрат с $p = 1$; — · — - правоъгълник с $p = 16$.

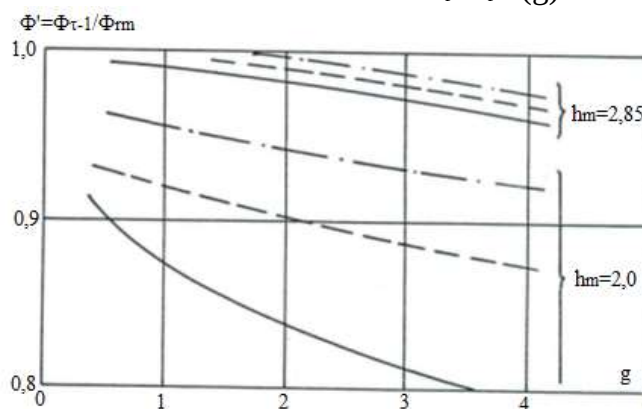
Потокът в цилиндричния магнит, при еднакви условия на намагнитване, се оказва по-малък отколкото в призматичен. При това в магнита с правоъгълно сечение потока е толкова по-голям, колкото е по-къс магнита.

Анализът на получените зависимости и графики показва, че намагнитването на материали от тип КОНИАЛ технически не е трудно да се осъществи при въздействие на серия намагнитващи импулси. Магнитната индукция, както се вижда от фиг. 3.8, ще нараства във всички слоеве на магнита.

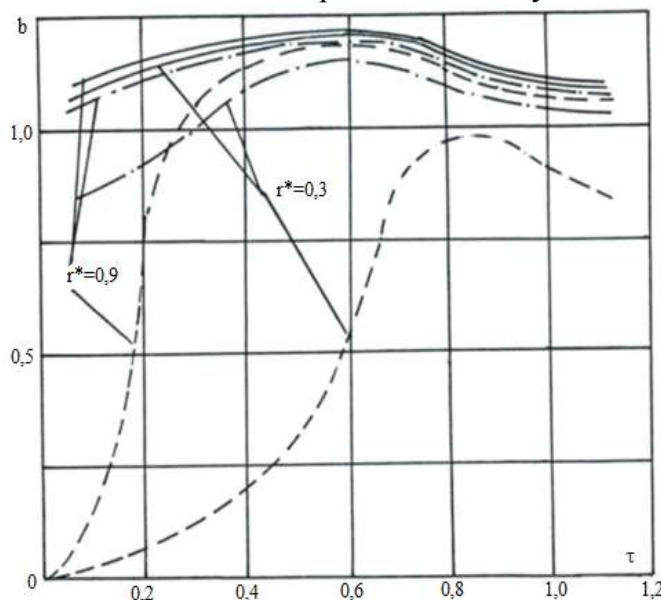
Това показва, че е целесъобразно използването на серия импулси при големи стойности на g , когато пълно намагнитване не се постига при въздействие с един импулс ($g > 0,4$). Подобряването на намагнитването се обяснява с отслабването на вихровите токове вследствие намаляването на магнитната проникваемост. След въздействие на третия импулс



Фиг. 3.6. Зависимост $\Phi_r/\Phi_{rm}(g)$



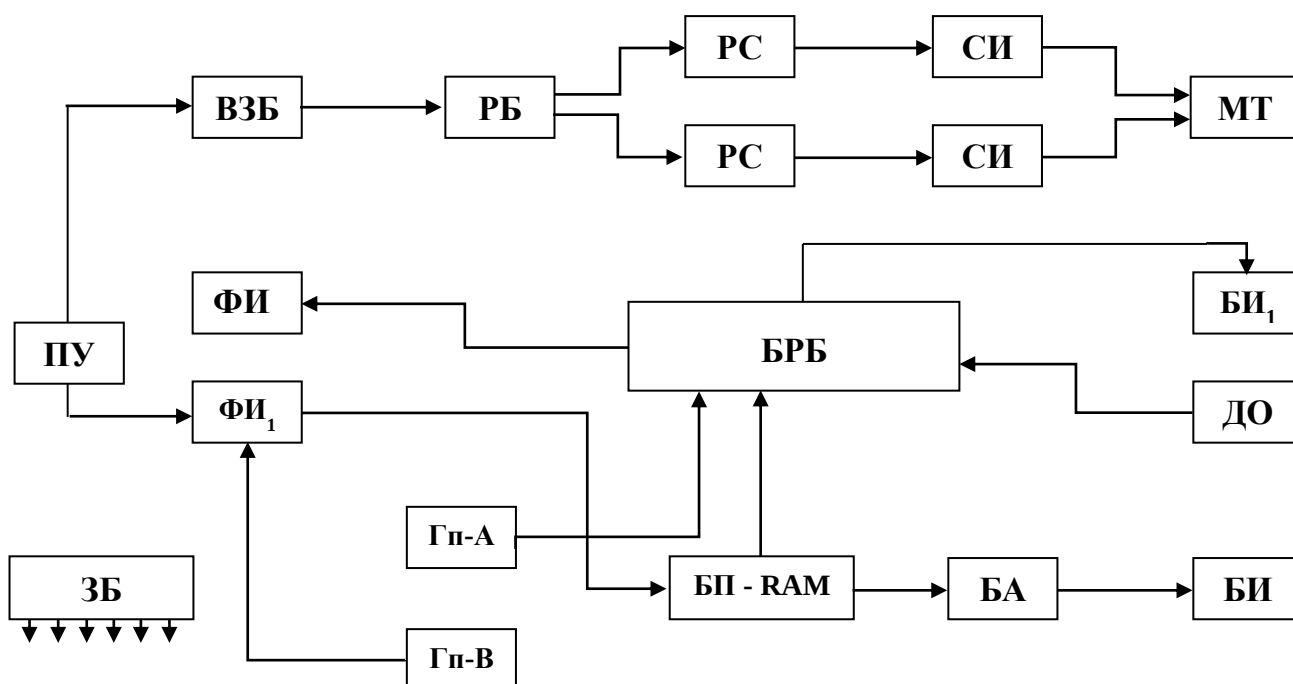
Фиг. 3.7. Зависимост на магнитния поток от в момента на завършване на импулса



Фиг. 3.8. Изменение на магнитната индукция при различен брой импулси

---- - 1-ви импулс; — · — - 2-ри импулс; — - 3-ти импулс

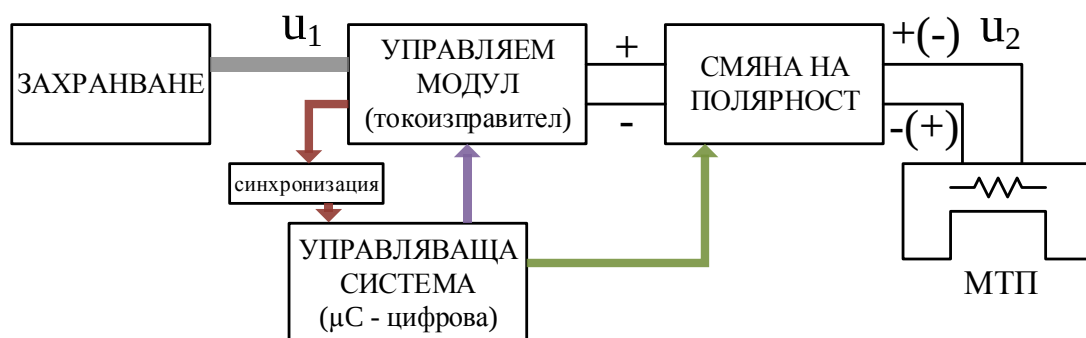
се управлява интуитивно; да не позволява случайно подаване на въздействие от оператора.



Фиг. 3.10. Блок схема на устройство за управление на МТП

ЗБ – Захранващ блок; ПУ – Пулт за управление; ФИ – Формировател на управляващи импулси; Гп – А – Генератор на правоъгълни импулси – А; Гп – В – Генератор на правоъгълни импулси – В; БП – Блок памет; БА – Брояч на адресно пространство; ФИСЕ – Формировател на импулси за силови елементи; БРБ – Броячно-реверсивен блок; БИ – Блок индикатор – А; БИ₁ – Блок индикатор – Б; ДО – Детектор на нула; ВЪЗБ – Време-задаващ блок; РБ – Разпределителен блок; РСЕ – Регулиращ силов елемент; СИБ – Силов изправителен блок

На фиг. 3.11 е показана блоковата схема на устройството. За захранване се използва еднофазна променливотокова мрежа с промишлена честота и напрежение 230V. Основното управляващо ядро е наречено „УПРАВЛЯВАЩА СИСТЕМА“ и е изградено с микрокомпютър. Заложената програма се грижи за управление на другите модули, за връзката с оператора и за изпълнение на различни блокировки.

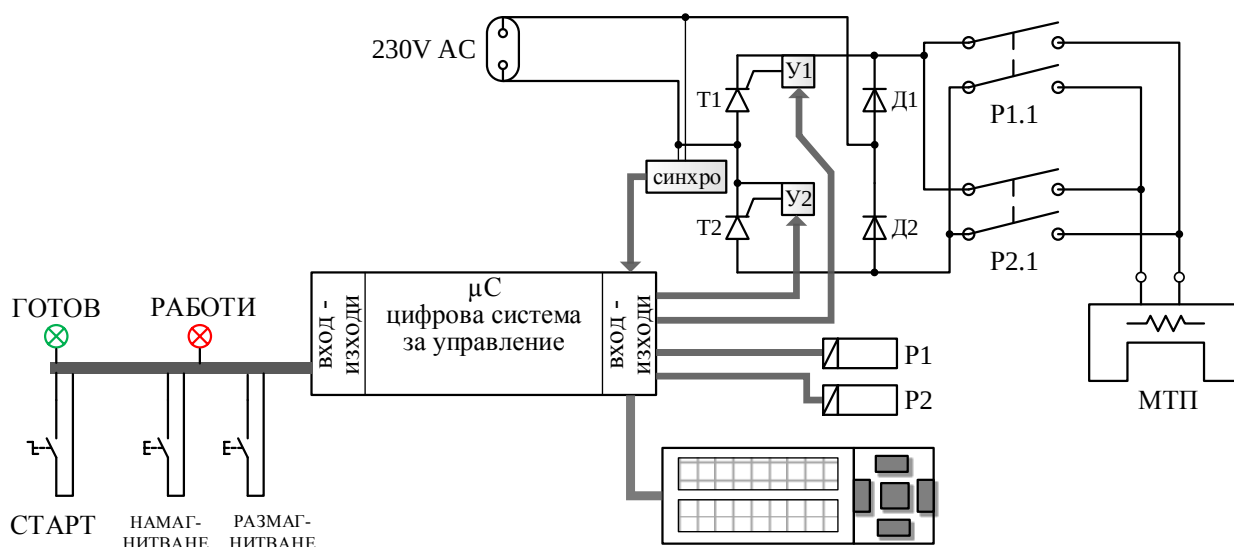


Фиг. 3.11. Блокова схема

Външното захранване се подава на „УПРАВЛЯЕМ МОДУЛ“, който е еднофазен полууправляем тиристорен токоизправител. За превключване на режима в „захващане“ или „освобождаване“ е предвиден модул „СМЯНА НА ПОЛЯРНОСТ“. Моментите, в които напрежението преминава през нула, или начало на полупериод, се установяват от модул „синхронизация“.

Координацията на отпушване на управляемия токоизправител и управлението на останалите модули е задача на „УПРАВЛЯВАЩА СИСТЕМА“, изградена на основата на микрокомпютър с управляваща програма.

Електрическата схема е показана на фиг. 3.12.



Фиг. 3.12. Електрическа схема

При управление на процесите на захващане и отпускане към МТП се подават минимум по два полупериода (изправени) от захранващото напрежение. От настройките на съответната стратегия може да се избира колко „импулса“ ще се подават към изхода и паузата между тях. Така наречените „импулси“ може да са от един до шест, като всеки „импулс“ може да е формиран от една до три двойки изправени полупериоди. Паузата между „импулсите“ може да се избира от 10ms до 150ms.

3.4. Изводи към ТРЕТА ГЛАВА

1. За намагнитване на постоянните магнити в МТП може да се използва както източник на постоянно магнитно поле, така и източник на импулсно магнитно поле.

2. Процесите на намагнитване, размагнитване и пренамагнитване са динамични, протичащи във времето. При МТП с голяма маса, времето необходимо за намагнитване или размагнитване е значително по-голямо от времето, необходимо за управление на приспособление с малка маса. Ето защо устройствата за управление трябва да имат възможност за регулиране на амплитудата и продължителността на подаваните импулси. Един от най-разпространените методи е импулсното управление, чието предимство е възможността за създаване на сравнително компактни устройства, които бързо управляват (намагнитват/пренамагнитват) системи със сложна конфигурация на магнитната верига.

3. Изследвано е влиянието на формата, продължителността и броя на импулсите при импулсно намагнитване на постоянните магнити. Целесъобразно е използването на серия импулси при големи стойности на g ($g > 0,4$), когато не се постига пълно намагнитване с един импулс.

4. При намагнитване с три импулса може най-пълно да се използва енергията на постоянните магнити. След въздействие на третия импулс

магнитният поток достига максимална стойност, затова използването на много импулси (повече от 3) не е целесъобразно.

5. Представени са схеми на устройства за импулсно управление на МТП с пълно размагнитване и без пълно размагнитване. И двете схеми дават възможност за регулиране на задържащата сила. В разработеното устройство за управление с пълно размагнитване се постига задоволително размагнитване с 8 размагнитващи импулса. Намаленият брой на размагнитващите импулси позволява съкращаване на необходимото време за размагнитване. Разработеното схемно решение се използва за управление на магнити в корабостроенето. Разработеното устройство за управление без пълно размагнитване се използва за управление на МТП в машиностроенето и в учебния процес.

6. Разработена е блокова и електрическа схема, с необходимите блокировки и управляващи органи, на цифрова система за управление на МТП. Системата е с възможности за настройки на въздействията в широки граници. Стартирането на съответния процес е лесно и съответно недопускащо случайно пускане. Може да се управляват разнообразни МТП, като се подбира подходяща стратегия за въздействие. Захранването е от стандартна еднофазна мрежа ниско напрежение с промишлена честота. Не са необходими специални захранващи източници.

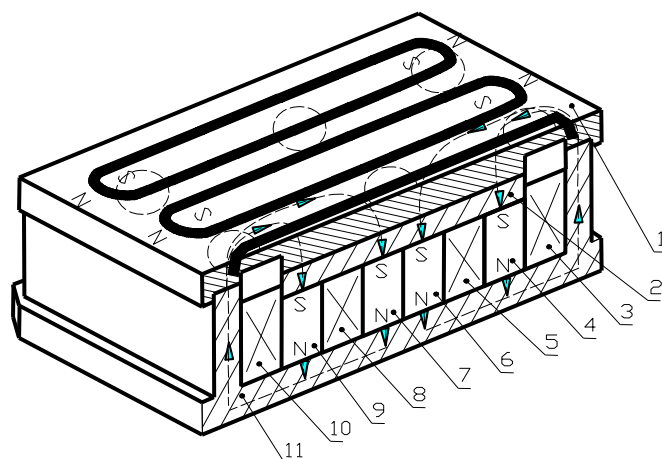
ГЛАВА 4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНО ИЗСЛЕДВАНЕ НА ПОСТОЯННОМАГНИТНИ ТЕХНОЛОГИЧНИ ПРИСПОСОБЛЕНИЯ С ЕЛЕКТРОИМПУЛСНО УПРАВЛЕНИЕ

4.1. Изследване на постоянно МТП за захващане на плоски феромагнитни детайли

Магнитните приспособления с постоянни магнити намират широко приложение последните години за окомплектоване на различни видове металорежещи машини. За целта се използват магнитните маси, с които се захващат плоски феромагнитни материали, при обработката им на машината. Внедряването на магнитните маси позволява да се решат редица сложни технологични задачи свързани с обработката на детайлите – обработка на детайли със сложна форма, получаване на висока точност при обработката и др.

Реализираният лабораторен модел на магнитна маса, показан на фиг. 4.1, е предназначен за захващане на плоски феромагнитни детайли. Масата е проектирана с представените във втора глава методика и програма.

Състои от четири правоъгълни лети магнита тип КОНИАЛ-44А, поставени между стоманени магнитопроводи, които отвеждат магнитния поток към адаптера и от там към захващания детайл. Върху



Фиг. 4.1. Магнитна маса

1 - адаптерна плоча; 2 - среден полюс;
3, 10 - намагнитваща намотка; 4, 9 - постоянни магнити; 5, 8 - неутрализираща намотка; 6, 7 - неутрализиращи магнити; 11 – корпус.

летите магнити са поставени бобини, които служат за намагнитването и пренамагнитването им.

Техническите характеристики на лят магнит тип КОНИАЛ-44А са дадени в Таблица 4.1. Изследваната магнитна маса е правоъгълна и е показана на фиг. 4.3.

Таблица 4.1.

	Минимална стойност	Номинална стойност
Остатъчна индукция B_r , Т	1,25	1,30
Коерцитивна сила H_c , kA/m	49,6	51,2
Максимална магнитна енергия BH_{max} , KJ/m ³	40,0	44,0
Магнитна индукция B_a в работната точка при BH_{max} , Т	1,05	-
Напрегнатост на магнитното поле в работната точка при BH_{max} , kA/m	-	41,6

Магнитопроводите на лабораторния модел на ПМТП са изработени от стомана, като всички допирни повърхности между постоянните магнити, магнитопроводите и адаптера са шлифовани с клас на грапавост 0,63. Адаптерът е с размери на работната повърхнина 630/200 mm.



Фиг. 4.3. Общ вид на магнитна маса

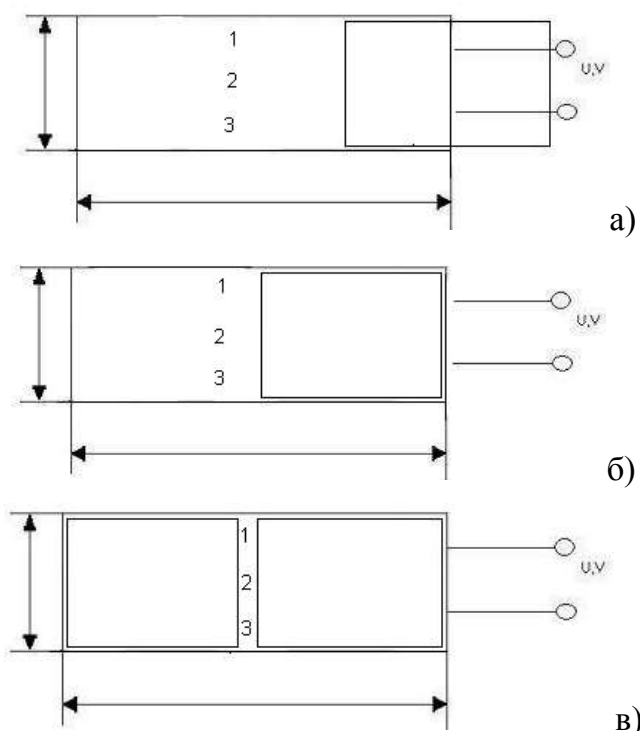
4.1.1. Изследване на силата на задържане, в зависимост от височината на детайла, за различни коефициенти на запълване

Изследването на изменението на силата на задържане в зависимост от височината на детайлите и коефициента на запълване на работната повърхност се извършва в три точки (1, 2 и 3), разположени както е показано на фиг. 4.4, за три различни коефициента на запълване k_3 на работната повърхност на адаптерната плоча – 25%, 50% и 100%.

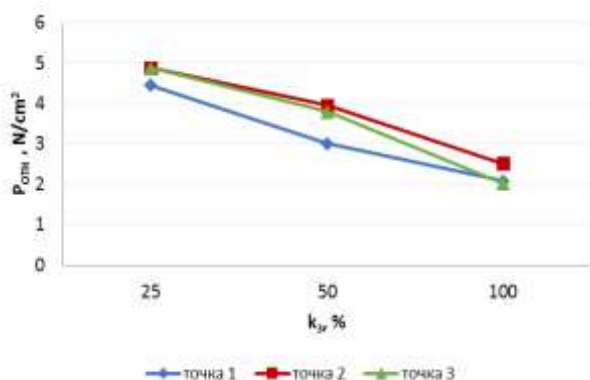
Измерванията се извършват при едно и също междуполусно разстояние и при една и съща височина на адаптера. Намагнитването е с продължителност $t_B = 1$ s. Опитните образци, с които се провежда измерването са с кръгла форма с:

$D_e = 36$ mm, $h_e = 4$ mm и $h_e = 8$ mm;

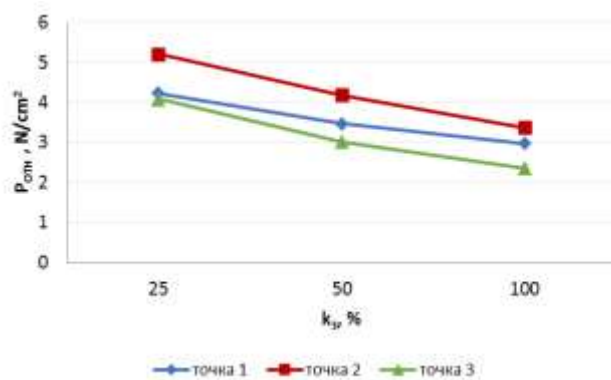
$D_e = 48$ mm, $h_e = 8$ mm и $h_e = 15$ mm.



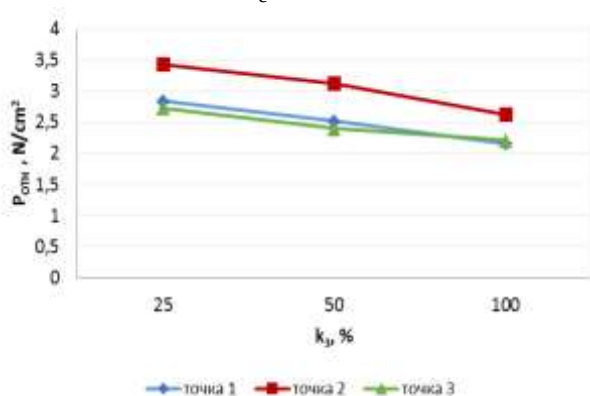
Фиг. 4.4. Изследване при различни коефициенти на запълване



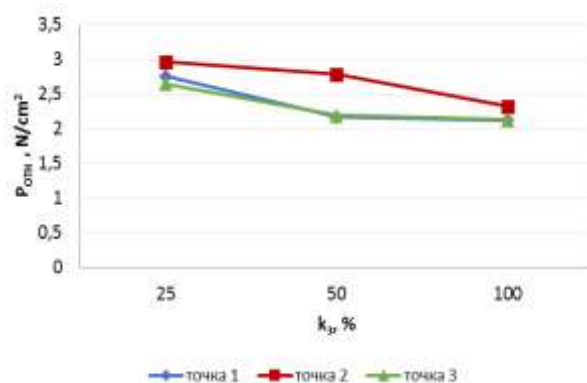
Фиг. 4.5. Относителна сила за $D_e=36\text{mm}$ и $h_e=8\text{mm}$



Фиг. 4.6. Относителна сила за $D_e=36\text{mm}$ и $h_e=4\text{mm}$



Фиг. 4.7. Относителна сил за $D_e=48\text{mm}$ и $h_e=8\text{mm}$

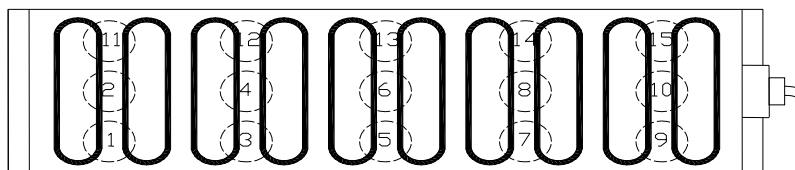


Фиг. 4.8. Относителна сила за $D_e=48\text{mm}$ и $h_e=15\text{mm}$

От направените измервания и анализ може да се обобщи: Силата е най-голяма в точка 2 (средата на масата), като с намаляване на k_z , тя се увеличава. При еталона с $D_e=36\text{mm}$ и по-малка височина $h_e=4\text{mm}$ задържащата сила в точка 2 е по-голяма с 6,3% за $k_z=25\%$, с 5,5% за $k_z=50\%$ и с 25,2% за $k_z=100\%$ от силата за еталона с $D_e=36\text{mm}$ и височина $h_e=8\text{mm}$. При еталона с $D_e=48\text{mm}$ и по-малка височина $h_e=8\text{mm}$ задържащата сила в точка 2 е по-голяма с 13,9% за $k_z=25\%$, с 11,2% за $k_z=50\%$ и с 11,8% за $k_z=100\%$ от силата за еталона с $D_e=48\text{mm}$ и височина $h_e=15\text{mm}$. Силата в точка 1 и точка 3 (по периферията на масата) с намаляване на k_z нараства. С увеличаване на диаметъра на еталона, моментната сила в изследваните точки нараства, а относителната сила намалява.

4.1.2. Изследване на равномерността на силата на задържане

Изследването на равномерността на силата на задържане се извършва върху работната повърхност на МТП, в означените на фиг. 4.9 точки на измерване. Избрани са 15 точки на измерване върху магнитната маса. Измерванията се правят при коефициенти на запълване 25%, 50%, 100% и дебелина на еталоните 2mm, 4mm, 8mm, 10mm и 14mm. Едновременно с изследване равномерността на силите на задържане се отчита и влиянието на височината на еталона и коефициента на запълване.



Фиг. 4.9. Контролни точки

На фиг. 4.10 е показано изменението на относителната сила в изследваните

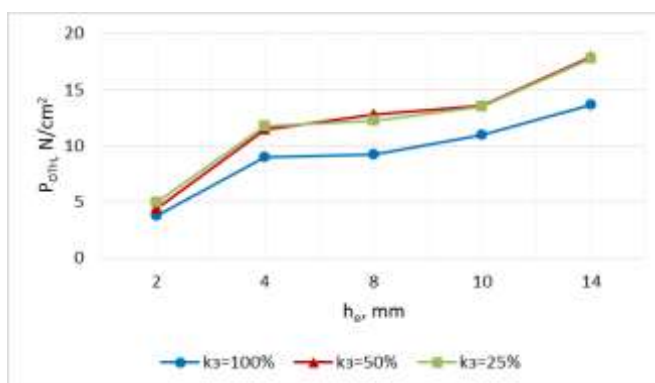
точки, при различни коефициенти на запълване. На основата на получените резултати могат да се направят следните изводи:

- С нарастване на дебелината на еталона расте и задържащата сила.

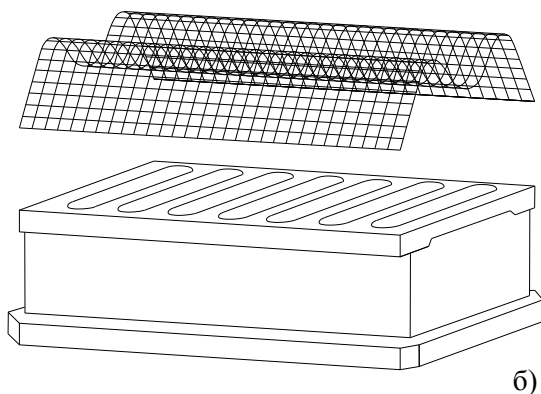
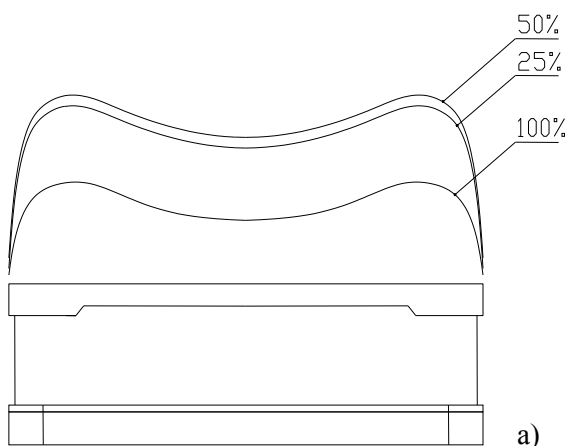
- При $k_3=100\%$ по-голямата част от магнитния поток е съсредоточен в запълващия феромагнитен материал и много малка част от него минава през еталона. При малки стойности на магнитния поток ще има и по-ниски стойности за силата.

- При $k_3=25\%$ малка част от магнитния поток е съсредоточена в запълващия материал, а останалата по-голяма част е съсредоточена в изпитвателния еталон. При малки дебелини на еталона силата има по-големи стойности, а при по-големите дебелини силата има по-малки стойности в сравнение с измерванията при $k_3=50\%$.

- При $k_3=50\%$ МТП е най-ефективно. При по-големите дебелини на еталоните силата има по-високи стойности, отколкото при $k_3=25\%$.



Фиг. 4.10. Изменение на относителната сила



Фиг. 4.11. Разпределение на силата на задържане

Таблица 4.10.

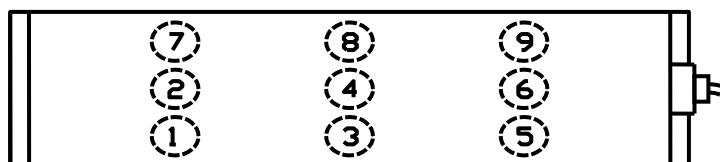
n_i	k_3		
	100%	50%	25%
	$P_{\text{ср отн}}, \text{N/cm}^2$	$P_{\text{ср отн}}, \text{N/cm}^2$	$P_{\text{ср отн}}, \text{N/cm}^2$
1	10,06	11,94	12,14
2	9,21	11,12	10,37
3	9,11	12,68	12,39
4	8,29	10,81	11,34
5	10,28	12,84	13,11
6	8,77	11,14	11,95
7	10,66	12,57	12,80
8	9,76	11,36	11,49
9	9,63	11,88	12,36
10	8,92	10,65	11,07
11	10,06	11,94	12,14
12	9,11	12,68	12,39
13	10,28	12,84	13,11
14	10,66	12,57	12,80
15	9,63	11,88	12,36

В Таблица 4.10 са дадени средните стойности на относителната сила $P_{отн}$ на задържане за всяка от изследваните 15 точки, за различни коефициенти на запълване. На фиг. 4.11 е показано разпределението на силата на задържане по ширината (фиг. 4.11a) и по дължината на адаптерната плоча (фиг. 4.11б), при различни коефициенти на запълване. $P_{отн}$ има една и съща големина по дължината на адаптерната плоча, а по нейната ширина в краищата е по-голяма, отколкото в средната ѝ част. Причина за това е, че полюсите са разположени в краищата на МТП. При $k_3=50\%$ се получават най-високи стойности на задържащата сила $P_{отн}$.

4.1.3. Изследване на влиянието на захранващото напрежение върху силата на задържане

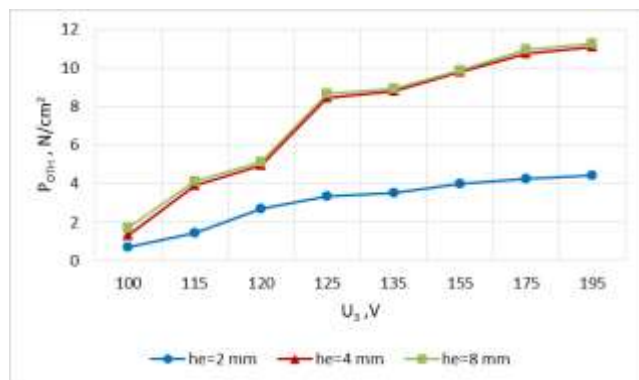
Измерванията са проведени за височина на адаптерната плоча 30 mm, за показаните на фиг. 4.13 девет контролни точки, за височина на еталоните 2mm, 4mm, и 8mm и всички коефициенти на запълване - 25%, 50% и 100%.

Захранващото напрежение се изменя от минимална стойност, при което се получава някаква сила на привличане до напрежението, за което е проектирано да работи МТП, т.е. 200V.



Фиг. 4.9. Контролни точки

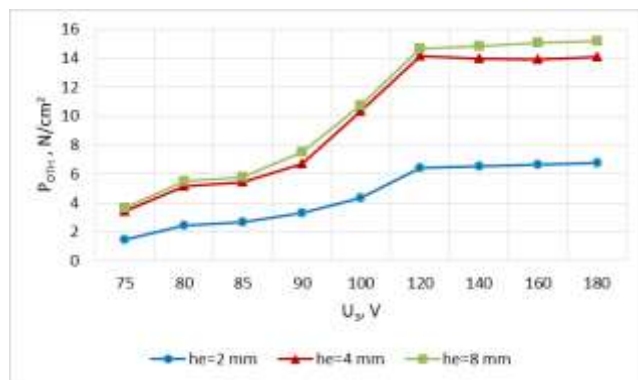
Изследванията показват, че минималната стойност на захранващото напрежение при $k_3=25\%$ и $k_3=50\%$ е 75V, а при $k_3=100\%$ е 100V. Напрежението се подава към ПМТП от изправител и се регулира с автотрансформатор. Със всеки еталон, за всяка контролна точка се извършват по три измервания и се определят средната моментна сила на задържане и относителната сила на задържане.



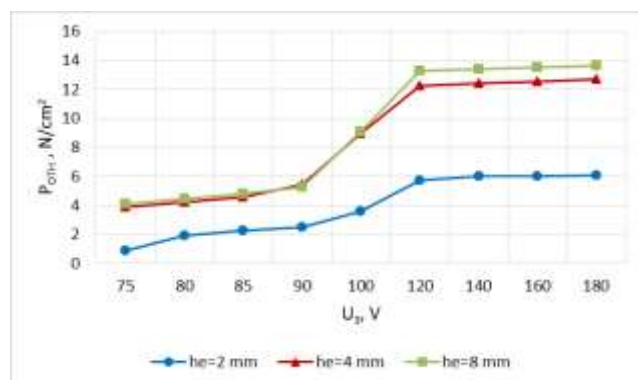
Фиг. 4.14. Относителна сила за $k_3=100\%$

На фиг. 4.14, фиг. 4.15 и фиг. 4.16 е показано изменението на относителната сила в зависимост от големината на захранващото напрежение, при коефициент на запълване на адаптерната плоча съответно $k_3 = 100\%$, $k_3 = 50\%$ и $k_3 = 25\%$, за изследваните три еталона.

На основата на получените експериментални резултати, могат да се направят следните изводи:



Фиг. 4.15. Относителна сила за $k_3=50\%$



Фиг. 4.16. Относителна сила за $k_3=25\%$

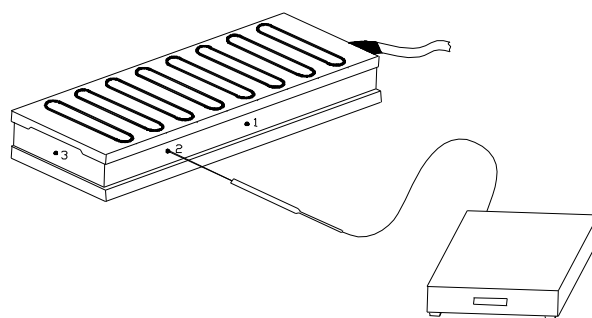
- При ниски стойности на U_3 големината на задържащата сила е малка. Това е така, защото при напрежение по-ниско от номиналното, при което работи МТП, работните точки се намират под точка А и магнитната индукция има ниски стойности, и следователно и задържащата сила ще бъде малка.

- При някаква определена стойност на U_3 кривите са успоредни на абцисната ос. Причина за това е, че увеличаването на напрежението над тази стойност не влияе върху положението на работната точка, а това положение е някъде в началото на участъка AB_{M2} .

- С увеличаване на h_e расте и $P_{отн}$ и при $k_3=50\%$ задържащата сила има най-висока стойност.

4.1.4. Изследване на нагряването на МТП

Поради наличието на намагнитваща и неутрализираща намотка, които са вътрешен източник на топлина, е необходимо да се направят измервания и да се провери дали има прегряване на намотките. Действителната температура на намотките не може да се измери, защото те се намират вътре в корпуса на МТП. Затова измерванията се правят в три контролни точки на външната част на корпуса (фиг. 4.17).



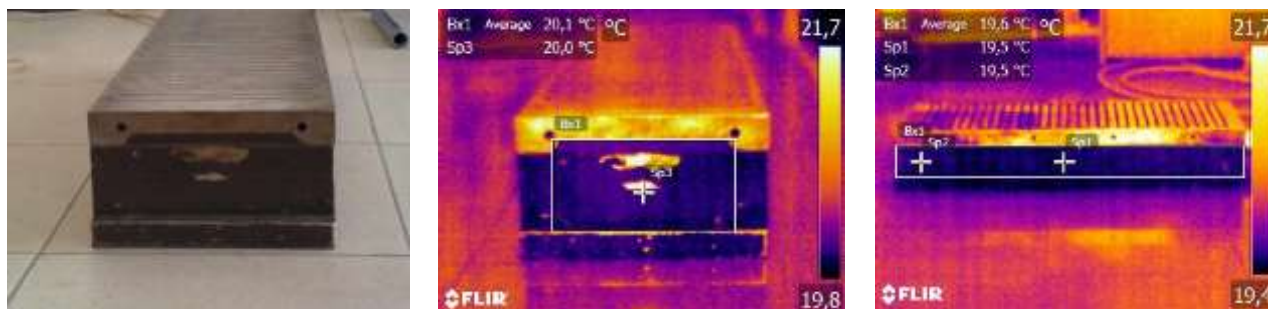
Фиг. 4.17. Опитна постановка за изследване на нагряването

Продължителността на измерването е 30 минути, като през 10 s се включва и изключва ПМТП. Толкова интензивен режим на работа е рядък, което прави получените резултати достоверни и реални. Получените стойности от всички измервания в отделните точки се осредняват.

При температура на околната среда $t_{ок. среда} = 19^0 C$ резултатите са: контролна точка №1: $t_{1cp} = 20^0 C$; контролна точка №2: $t_{2cp} = 20^0 C$; контролна точка №3: $t_{3cp} = 21^0 C$. Следователно средната температура на изследваното магнитно захващащо приспособление е $t_{cp} = 20,33^0 C$.

Температурата на нагряване на приспособлението е $t_n = t_{cp} - t_{ок. среда} = 20,33 - 19 = 1,33^0 C$.

Проведено е и изследване на нагряването на магнитно-технологичното приспособление с помощта на термовизионна камера.



Фиг. 4.18. Изображения МТП преди започване на изследването

На фиг. 4.18 са представени фотографското и термовизионното изображение на МТП преди започване на изследването. Средната температура на активната част на МТП, получена от термовизионното изображение, преди започване на изследването е 20,1°C. Стойностите на температурата и прегряването на МТП в разглежданите точки, получени по термовизионния способ са дадени в Таблица 4.23. Изменението на температурата измерена с термовизионната камера е 1,567°C. Тази температура е с 0,237°C по-висока от измерената с контактен термометър. Причина за получената разлика е, че безконтактния метод на измерване има по-малка точност.

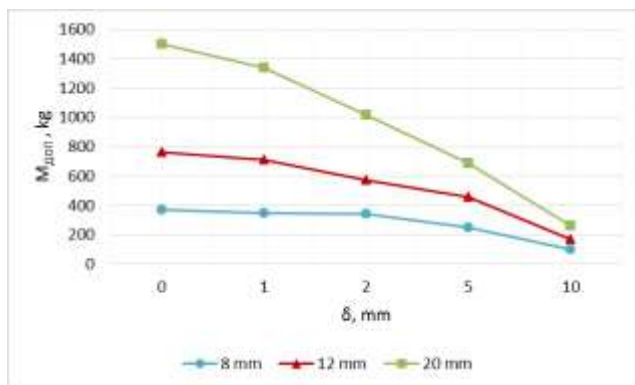
Таблица 4.23.

	Точка на измерване			Средна стойност
	1	2	3	
Начална температура, °C	19,5	19,5	20	19,667
Крайна температура, °C	21,1	21	21,6	21,233
Прегряване, °C	1,6	1,5	1,6	1,567

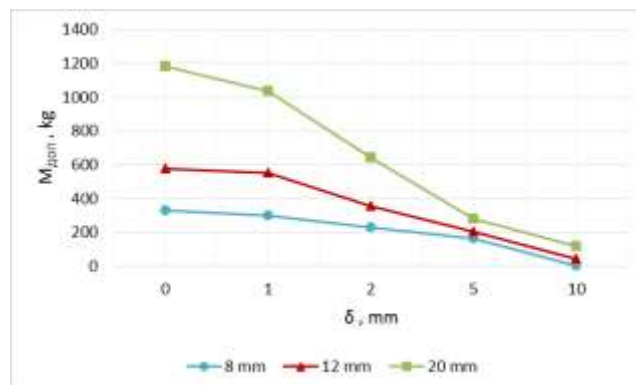
4.2. Изследване на автономен товароподемен магнит

За силова характеристика на товароподемните магнити най-често се използва товароподемността, която се отразява в паспорта на приспособлението. Товароподемността се определя от минималната сила на притегляне. Автономният товароподемен магнит е с товароподемност 1000 kg, има две еднакви намотки и може да реализира три режима на работа: Режим Р1 – работа при паралелно свързване на намотките; Режим Р2 – работа при последователно свързване на намотките; Режим Р3 – работа само на една намотка.

За построяване на зависимостта на допустимата сила на притегляне $P_{\text{доп}}$ е необходимо да се направят редица опити на захващане и освобождаване на детайли с различна дебелина и при различна въздушна междина. За целта е реализирана опитна постановка, като детайлите се захващат неподвижно към земята, а силата на отцепване се постига с помощта на телфер. Направени са по 10 опита, като е взета в предвид най-ниската (гранична) стойност на силата, при която магнита изпуска детайла. При захващането детайла трябва да покрива изцяло полюса на магнита. Въздушната междина δ между детайла и полюса на магнита е осигурена от еталонни неферромагнитни подложки. Реализирани са $\delta=0, 1, 2, 5, 10$ mm. Изследвани са детайли с височини 8, 12 и 20 mm. На фиг. 4.22, фиг. 4.23 и фиг. 4.24 са показани в графичен вид изменението на преобразуваната сила в допустима маса, в зависимост от въздушната междина и височината на еталона, за всеки от трите режима на работа.

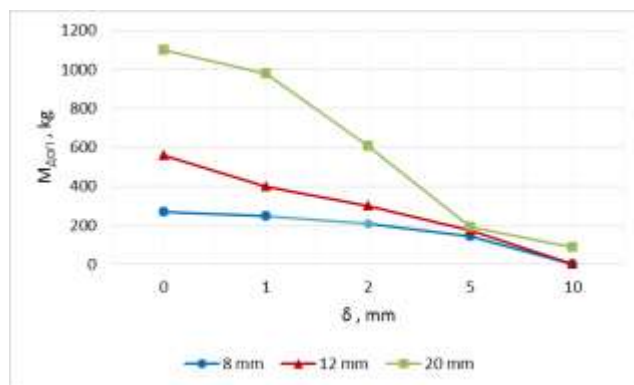


Фиг. 4.22. $M_{\text{доп}}$ в зависимост от δ и h_e при режим Р1



Фиг. 4.23. $M_{\text{доп}}$ в зависимост от δ и h_e при режим Р2

Най-добри резултати, т.е. най-голяма сила се получава при малки δ и голяма височина на детайла. С намаляване на h_e се намалява сечението, през което преминава магнитния поток, насищане на материала на детайла, а оттам затваряне на магнитния поток по пътищата на разсейване, което води до намаляване на силата дори и при малки δ . Увеличаването на δ води до същия резултат – затваряне на магнитния поток по пътищата на разсейване и намаляване на отцепващата сила. Това показва, че товароподемността не е константна величина и следва да се свързва с условията, за които се отнася и при които е определена.



Фиг. 4.24. $M_{\text{доп}}$ в зависимост от δ и h_e при режим РЗ

4.3. Методика за определяне на силата на притегляне на МТП

За силова характеристика на магнитните приспособления най-често се използва относителната сила на притегляне, която се дава в паспорта на приспособлението. Проведените изследвания показват, че тя не се явява обективна и само по нея не може да се съди за възможностите на приспособлението.

Магнитните приспособления могат да имат различно конструктивно изпълнение. Конструкцията им се определя от вида на източника на енергия, формата на полюсите, начина на управление и др. При тези фактори методиката на изпитване отразява само частен случай на конструктивно изпълнение и остават много варианти за субективно тълкуване. Размерите на изпитателния образец се задават в зависимост от ширината на полюсите и не отчитат останалите конструктивни особености и размери. Затова не е правилно сравняването или по-точно няма възможност за сравняване на приспособленията по силова характеристика.

Определени трудности възникват с измерването на отлепващата сила. За измерването ѝ се използват различни видове динамометри, които имат различен клас на точност и внасят допълнителна грешка при измерването. Освен това силата на притегляне естествено зависи от вида на стоманата, гладкост на опорната повърхност, от контакта на еталонния образец със съседни детайли и др. Всички тези фактори внасят съществени грешки при измерването.

Всичко това налага разработването и внедряването на принципно нова методика за определяне на силата. При нея условията на изпитване е необходимо максимално да бъдат приближени до работните условия. По тези съображения е необходимо за определяне на силовата характеристика за изпитателни образци да се използват еталонни детайли.

Формата на еталонния детайл се избира в зависимост от конфигурацията на опорната повърхност на реалния детайл и в зависимост от функционалната връзка между силата на притегляне и формата на опорната повърхност на детайла, която може да бъде една или съвкупност от елементарни форми. За опростяване на методиката формата на еталонния образец е избрана кръгла. Дисковата форма е избрана защото и при реални условия голям брой детайли

закрепени на устройството имат контакт помежду си по ограничена повърхност. Изследванията са показали, че използването на еталонни образци с кръгла форма значително увеличава точността на експеримента в сравнение например с образци с правоъгълна форма. Еталонните детайли обикновено се изработват от Ст 20 с диаметри 18, 25, 35, 50, 70 mm.

Изпитанията се провеждат в следната последователност:

1. Върху работната повърхност на изпитваното магнитно приспособление се поставят комплект еталони с най-малък диаметър така, че да покрият цялата работна повърхност.

2. Измерването на отлепващата сила се извършва с динамометър, като силата трябва да е перпендикулярна на еталона и работната повърхност, а точността на измерването е в границите $\pm 5\%$.

3. Преместването на образца трябва да бъде в такова направление, че да не се пропуска участък с минимална сила на притегляне. Премествайки еталонния образец с диаметър D от едно положение в друго със стъпка l се измерва отлепващата сила P във всяка точка.

4. Получените резултати за отлепващата сила не се явяват случайни величини. Те зависят от диаметъра на образца, от ширината на полюса, от междуполусното разстояние, от стъпката на преместването и др. Множеството фактори, които влияят върху силата на притегляне и между които има сложна взаимна връзка налагат получените експериментални данни да бъдат обработени статистически.

5. За конкретно магнитно приспособление ширината на полюсите и междуполусното разстояние са постоянни величини. От стъпката на преместване зависи броя на изследваните участъци, които не могат да бъдат строго определени за различните магнитни приспособления. Обикновено стъпката на преместване на еталона е от 0,16 до 0,14 от диаметъра му.

6. Ако при изпитването на зададен комплект еталони се получава минималната сила на отлепване равна на нула, тогава се преминава към комплект еталони с по-голям диаметър.

На основата на разработената методика е проведено изпитване на МТП.

4.4. Изводи към ЧЕТВЪРТА ГЛАВА

1. Изследвана е магнитна маса с електроимпулсно управление за окомплетовка на шлайфмашини и фрези. Изследвани са равномерността на задържащата сила и нейното изменение за различни коефициенти на запълване, височина и площ на еталоните, големина на захранващото напрежение. Изследвано е нагряването на масата при най-тежкия режим на работа.

2. Силата на задържане е най-голяма близо до средата на магнитната маса (точка 2). С увеличаване на коефициента на запълване силата в изследваните точки намалява. С увеличаване на диаметъра на еталона, моментната сила нараства, а относителната намалява.

3. Относителната сила на задържане запазва стойността си по дължината на адаптерната плоча, а по нейната ширина в краищата е по-голяма, отколкото в средната ѝ част. Причина за това е, че полюсите са разположени в краищата на магнитно-технологичното приспособление.

4. При ниски стойности на захранващото напрежение големината на задър-

жащата сила е малка, поради ниско разположената работна точка върху кривата на размагнитване. При някаква определена стойност на захранващото напрежение (около 120 V) увеличаването на напрежението не променя големината на задържащата сила, тъй като положението на работната точка върху кривата на намагнитване не се променя. С увеличаване на дебелината на еталона относителната сила на задържане нараства и при коефициент на запълване 50% тя има най-голяма стойност.

5. Измерена е температурата в три точки с контактен и безконтактен метод. Получените стойности на прегряването са съответно 1,33°C за контактният метод и 1,567°C при безконтактния метод. Причина за разликата е, че безконтактният метод на измерване има по-малка точност. Поради малкото прегряване характеристиките на магнитите се запазват стабилни.

6. Изследван е автономен товароподемнен магнит с електроимпулсно управление при три режима на работа. Изследвано е влиянието на въздушната междина и височината на детайла върху отцепващата сила. Най-голяма сила се получава при малки въздушни междини и голяма височина на детайла. С намаляване на височината на детайла се намалява сечението, през което преминава магнитният поток, което води до намаляване на силата дори и при малки въздушни междини. Увеличаването на въздушната междина води до същия резултат – намаляване на отцепващата сила. Следователно товароподемността на товароподемния магнит не е константна величина и следва да се свързва с условията, за които се отнася и при които е определена.

7. Разработена е методика за определяне на силата на притегляне на магнитно-технологични приспособления. По разработената методика е проведено изпитване на МТП с електроимпулсно управление.

8. Върху точността на измерванията могат да окажат влияние следните фактори: неточното поставяне на еталона на едно и също място; дърпането на еталона не винаги е перпендикулярно; времето за намагнитване и размагнитване не винаги е едно и също; състоянието на работната повърхност – наличие на грапавини, зацапване или корозия.

9. Получените експериментални резултати и графични зависимости могат да бъдат използвани при експлоатацията на МТП за избор на подходящи режими на работа.

НАУЧНО-ПРИЛОЖНИ И ПРИЛОЖНИ ПРИНОСИ

В дисертационният труд приносите могат да бъдат класифицирани като научно-приложни и приложни.

Научно-приложни приноси са:

1. Разработена е инженерна методика за проектиране на магнитната система на МТП.

2. Разработени са алгоритъм и компютърна програма за автоматизиране на проектирането на МТП с постоянни магнити и определяне на оптималните им параметри.

3. Разработени са схемни решения на устройства за импулсно управление на МТП - с пълно размагнитване и без пълно размагнитване. Представените схемни решения дават възможност за регулиране на задържащата сила. Устройството, работещо с пълно размагнитване се използва за управление на магнити в

корабостроенето. Устройството за управление без пълно размагнитване се използва при МТП в машиностроенето и в учебния процес.

4. Разработена е цифрова система за управление на МТП с необходимите блокировки и управляващи органи. Системата позволява настройка на въздействията в широки граници. Може да се използва за управление на разнообразни МТП, чрез избор на подходяща стратегия за въздействие.

5. Разработена е методика за определяне на силата на притегляне на МТП.

Приложни приноси са:

1. Чрез разработената компютърна програма са проектирани и внедрени в експлоатация магнитни маси и товароподемни магнити с електроимпулсно управление. Програмата се използва и в учебния процес. Използването на компютърната програма води до значително подобряване на качеството на разработваните магнитни приспособления, като силата на задържане се увеличава с повече от 20%.

2. Изследвано е влиянието на формата, продължителността и броя на импулсите при импулсно намагнитване на постоянните магнити. Целесъобразно е използването на серия импулси при големи стойности на g ($g > 0,4$), когато не се постига пълно намагнитване с един импулс.

3. При намагнитване с три импулса може най-пълно да се използва енергията на постоянните магнити. След въздействие на третия импулс магнитният поток достига максимална стойност, затова използването на повече от 3 импулса не е целесъобразно.

4. Проведено е експериментално изследване на постоянно-магнитни технологични приспособления:

- Магнитна маса с електроимпулсно управление за окомплектовка на шлайфмашини и фрези. Изследвани са равномерността на задържащата сила и нейното изменение за различни коефициенти на запълване, височина и площ на еталоните, големина на хранящото напрежение, нагряване на масата при най-тежкия режим на работа.

- Автономен товароподемен магнит с електроимпулсно управление при три режима на работа. Изследвано е влиянието на въздушната междина и височината на детайла върху отцепващата сила.

СПИСЪК НА ПУБЛИКАЦИИТЕ ПО ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

1. Цанев Ц., А. Петлешков, Изследване на магнитно технологични приспособления, Енергиен форум 2004, 11-13 юни 2004, Варна, Сборник доклади том II, стр. 274-279.

2. Петлешков А., Ц. Цанев, С. Цветкова, Влияние на напрежението върху задържащата сила на магнитни технологични приспособления, Енергиен форум 2005, 8-11 юни 2005, Варна, Сборник доклади том 2, стр. 265-268.

3. Петлешков А., Изследване на равномерността на задържащата сила на магнитни технологични приспособления, Енергиен форум 2005, 8-11 юни 2005, Варна, Сборник доклади том 2, стр. 269-272.

4. Петлешков А., Импулсно управление на магнитно-технологични приспособления, Енергиен форум 2006, Сборник доклади том II, Варна, 14-17 юни, 2006, стр. 244-248.

5. Петлешков А., Изследване на автономен товароподемен магнит, Енергиен форум 2007, Сборник доклади том II, 13-16 юни 2007, Варна, стр. 437-441.

6. Петлешков А., Изследване на нагряването на магнитни технологични приспособления с импулсно управление, Енергиен форум 2008, Сборник доклади том II, 11-14 юни 2008, Варна, стр. 331-333.

7. Петлешков А., Управление на магнитно-технологични приспособления, Енергиен форум 2010, Сборник доклади, 23-26 юни 2010, Варна, стр. 334-338.
8. Петлешков А., Изследване на равномерността на задържащата сила на магнитни технологични приспособления, списание ЕНЕРГИЕН ФОРУМ, бр. 15-16, юни 2015, стр. 81-83, ISSN 1313-2962, Енергиен форум 2015, 24-26 юни 2015, Варна, стр. 49-52.
9. Петлешков А., С. Цветкова, С. Пешев, Изследване на магнитна маса, VIII Конференция на Електротехнически факултет „ЕФ 2016“, 12-15 септември 2016, Варна, България, ГОДИШНИК на ТУ–София, 2017, стр. 143-150, ISSN 1311-0829.
10. Петлешков А., Методи за намагнитване на магнитно-технологични приспособления, X Конференция на Електротехнически факултет „БулЕФ 2018“, 11-14 септември 2018, Созопол, България, ГОДИШНИК на ТУ–София, 2018, ISSN 1311-0829 (под печат).
11. Ангелов И., А. Петлешков, Цифрова система за управление на магнитно-технологични приспособления, X Конференция на Електротехнически факултет „БулЕФ 2018“, 11-14 септември 2018, Созопол, България, Годишник на ТУ–София, 2018, ISSN 1311-0829 (под печат).

Изказвам благодарност на научните си ръководители проф. д-р инж. Цанчо Цанев и доц. д-р инж. Светлана Цветкова за осъществяването на този дисертационен труд. Благодаря също така на всички колеги от катедра “Електроснабдяване, електрообзавеждане и електротранспорт” за помощта и съдействието, които са ми оказали.

MAGNETIC-TECHNOLOGICAL DEVICES WITH PULSE CONTROL

MSc. Eng. Angel Stoyanov Petleshkov

Abstract: In chapter one a research and analysis of the achievements in the area of magnetic-technological devices are done. In this chapter the tasks of the Ph.D. thesis are formulated. In chapter two “Design of permanent magnet technological devices with pulse control” a methodology and computer program for design and optimization of magnetic-technological devices with pulse control are developed. Chapter three “Pulse control of magnetic-technological devices” presents peculiarities and schemes for pulse control systems of permanent magnet technological devices. In chapter four “Experimental study of permanent magnet technological devices with pulse control” a methodology and results from an experimental study of permanent magnet technological devices with pulse control are presented. The influence of the size and height of the workpiece, the fill coefficient and the supply voltage on the holding force and its uniformity, has been studied. A study of the temperature rise of the permanent magnet technological device with pulse control has also been done.