



ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ – СОФИЯ
ЕЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИ ФАКУЛТЕТ

Катедра „ЕЛЕКТРИЧЕСКИ АПАРАТИ“

маг. инж. Йоско Славеев Балабозов

МОДЕЛИРАНЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ НА
ЕЛЕКТРОМАГНИТИ С ПОСТОЯННИ МАГНИТИ
ЗА БРАЙЛОВ ЕКРАН

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

на дисертация
за присъждане на образователна и научна степен
„ДОКТОР“

Направление: 5.2 „Електротехника, електроника и автоматика“

Научна специалност: „Електрически апарати“

Научни ръководители:

проф. д-тн инж. Иван Стоянов Ячев
доц. д-р инж. Кръстьо Лалов Хинов

Научно жури:

1. проф. д-тн инж. Иван Стоянов Ячев
2. проф. д-тн инж. Илиана Йорданова Маринова
3. проф. д-тн инж. Александър Крумов Александров
4. проф. д-р инж. Иван Костадинов Миленов
5. доц. д-р инж. Петър Иванов Държанов

София

2016

Дисертационният труд съдържа 5 глави, изложени на 126 страници, в които са включени 105 фигури. Списъкът на използваните литературни източници е съставен от 113 заглавия.

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

Дисертационният труд е обсъден и насочен за защита на заседание на разширен Катедрен съвет на катедра „Електрически апарати“ при Технически университет – София, състояло се на 18.07.2016 г.

Защитата на дисертационния труд ще се състои на 14.11.2016 г. от 15:00 часа в залата на БИЦ, Технически университет - София.

Материалите по защитата са на разположение на интересуващите се в канцеларията на Електротехнически факултет при Технически университет - София.

Автор: маг. инж. Йоско Славеев Балабозов

Заглавие: Моделиране и оптимизация на електромагнити с постоянни магнити за Брайлов екран

Издателство на Технически университет - София

УВОД

Постоянното развитие на техниката и все по-голямото обвързване на човека в съвременния свят с компютърните системи и с редица други високотехнологични устройства, затрудняват интеграцията на хората в неравностойно положение. Тази причина, дава импулс на учените да работят по различни идеи, чрез които да улеснят развитието на тези хора и да им дадат възможност за един пълноценен живот. Като част от тази група са и незрящите хора. В момента за тях са налични специализирани екрани, терминали, принтери, скенери и други устройства, чрез които се улеснява достъпа им до информацията. Бъдещото развитие на технологиите и появата на нови такива, ще направи по-достъпни така наречените тактилни екрани. Чрез тях незрящите хора ще имат достъп до графична информация, тоест ще могат да си изграждат представа за най-различни символи, фигури, графики и цели изображения. В тази насока има разработени редица технологии на базата на които са реализирани Брайлови устройства. Част от тях се използват успешно в специализирани зали при провеждането на обучение на незрящи хора. Други се използват като персонални устройства, но поради високата им цена разпространението им е ограничено.

Практически реализираните Брайлови екрани за персонална употреба са базирани на група от Брайлови клетки, разположени една до друга, като по този начин образуват ред, в който се представя информация с помощта на символите от Брайловата азбука. Всяка Брайлова клетка е съставена от 6 или 8 подвижни точки подредени в две колони. Издигането на комбинация от тези точки във всяка клетка, образува релефен символ, съответстващ на определена буква, цифра, препинателен знак или друг символ от стандартните комбинации за съответния език. Допълнителна информация и кратка ретроспекция на развитието на Брайловата азбука е дадена в приложенията към дисертационния труд.

За задвижването на Брайловите точки се използват най-различни електромеханични устройства, базирани на пиезоелектричен ефект, сплави запамятаващи формата си, DC мотори, електромагнити и други. Електромагнитите предлагат някои предимства пред другите технологии, като ниска цена, висока енергоефективност, висока надеждност. Въпреки тези предимства в световен мащаб липсват достатъчно надеждни разработки на Брайлови екрани, ползващи електромагнитни задвижващи модули. Основната причина за това е липсата на съществуващи конструктивни решения на електромагнити, които да удовлетворяват специфичните изисквания, които се предявяват към Брайловите екрани.

1. АНАЛИЗ НА СЪСТОЯНИЕТО НА ПРОБЛЕМА

1.1. ОБЩИ СВЕДЕНИЯ И ТЕХНОЛОГИИ ПРИЛОЖИМИ ПРИ СЪЗДАВАНЕТО НА БРАЙЛОВ ЕКРАН

Динамичен (опресняващ се) Брайлов екран е устройство за незрящи хора, което е в състояние да променя предоставяната информация вследствие на подадена нова информация от външен източник (компютър).

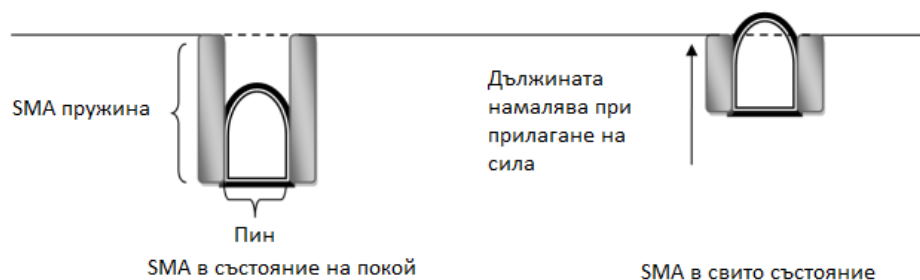
При разработката на такива устройства в световен мащаб са изследвани и приложени следните технологии:

- Пиезоелектрична технология – Брайловите опресняващи се екрани, използващи пиезоелектрични модули са преобладаваща част от всички серийно разработвани устройства. Принципът им на действие се основава на това, че при подаването на напрежение към пиезо кристал, той се деформира механично, тоест променя обема си за времето, през което е под напрежение. Тази промяна на обема е адаптирана за създаването на сила, която да променя състоянието на така наречените пинове (игли със сферичен край). Голям недостатък на тази технология е високата цена на крайното устройство, която главно се формира от количеството на използвания пиезоелектричен материал;
- Технологиите „Нагревателни намотки с температурно чувствителна пластмаса“ и „Матрица от органични пер-флуорирани полимерни транзистори с вграден йонен слой“, в момента заемат изследователската област на пазара, но все още нямат голям принос в живота на потребителите и Брайловото обучение;
- Сплав запамятаваща формата си (Shape memory alloy - SMA) – Принципът на действие се основава на промяната на формата или обема на материал вложен в модула, когато се подаде напрежение. Тази промяна на формата предизвиква нарастване, тоест повдигане на Брайловите точки;
- DC мотори – Те са с различни размери, входно напрежение и характеристики. В най-общи линии те трябва да имат две посоки на движение права и обратна, за да могат да накарат „Брайловите точки“ да се повдигнат или приберат;
- Електромагнитна технология – При нея за задвижване на Брайловите клетки се използват соленоиди или релета. Те ползват принципа на електромагнетизма, създавайки механична сила чрез промяна на електромагнитното поле.

В един от литературните източници е предложена концепция за хардуерна реализация на графичен интерфейс за незрящи хора. Разработена е електрическа схема за управление на точките на екрана, базирана на микроконтролер. Даденият в разработката програмен алгоритъм е база за разработка на софтуерната среда към предложеното хардуерно решение. Използват се съществуващи серийно произвеждани микро соленоиди.

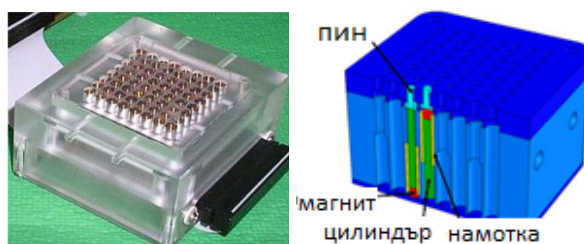
В друг източник са дадени нови концептуални решения на задвижващи електромагнитни механизми. Описани са предимствата и недостатъците на ново предложената конструкция.

В литературата е предложено и електронно Брайлово устройство за учебни цели. Разработена е електронна схема и управляваща логика, базирана на микроконтролерна система тип „Arduino“. В работата са разгледани редица технологии за реализация на Брайловите клетки, като основният фокус е насочен към технологията „Сплав запамятаваща формата си (SMA-Shape memory alloy - SMA)“, дадена на фиг. 1.1.



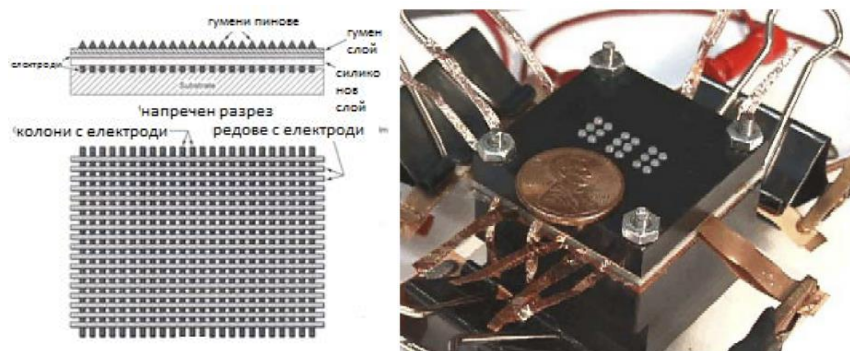
Фиг. 1.1 – Брайлов пин управляван чрез сплав запамятаваща формата си

Известен е и електромагнитен тактилен дисплей, чиято включва софтуерна част, чрез която се подава информацията към хардуерна управляваща част, която от своя страна подава команди за превключване на Брайловите пинове, които се задвижват от електромагнитни задвижващи устройства. На фиг. 1.2 са показани изследваните в работата прототипи на електромагнитните задвижващи устройства. От същия авторски колектив в друга публикация са разгледани и обобщени перспективни технологии, чието развитие би довело да принципно нови възможности за взаимодействие на хората в неравностойно положение с компютърните системи.



Фиг. 1.2 – Брайлови клетки с електромагнитни задвижващи устройства

В литературните източници са разгледани технологии, при които се използват електроактивни полимери, вибротактилни клетки, диелектрични еластомери, термо-пневматични задвижващи устройства и други, включително патентована конструкция на Брайлов пин реализиран чрез задвижващо устройство с електроактивен полимер.



Фиг. 1.3 – Прототипи на Брайлова клетка с електроактивни полимери

В редица литературни източници е извършено моделиране на електромагнитни задвижващи устройства с постоянни магнити, във връзка с намирането на динамичните им характеристики.

1.2. ПРОУЧВАНЕ НА СЪЩЕСТВУВАЩИ КОНСТРУКЦИИ

1.2.1. Конструкция Ех-1 – Екран с електромагнитни резонатори

Устройството съдържа матрица 3x3 от модули с електромагнитни резонатори. Всеки модул създава 0 или 1, тоест долно или горно положение. Разстоянието между отделните модули в това устройство е относително голямо - 4 mm. Това се налага поради влиянието между съседните модули.



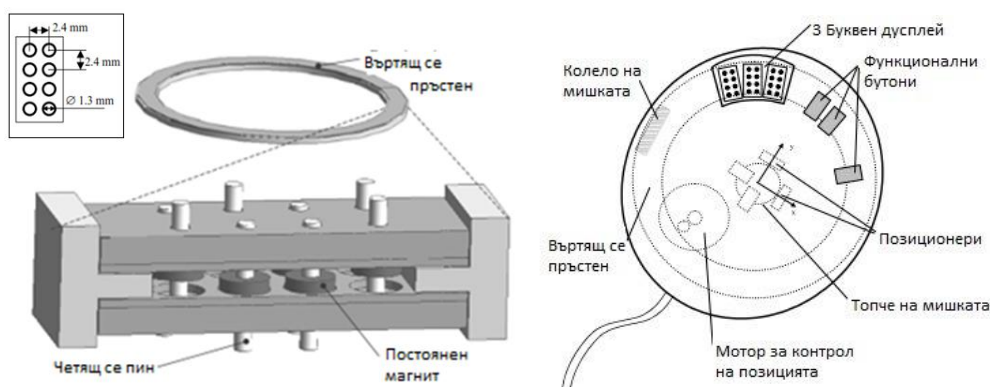
Фиг. 1.4 - 2D екран задвижван от електромагнитни резонатори

1.2.2. Конструкция Ех-2 – Брайлова мишка

За разлика от другите технологии, при които се използват група от Брайлови клетки (от 20 до 80 броя), вградени в линеен Брайлов екран, идеята на показаната на фиг. 1.5 конструкция е следната:

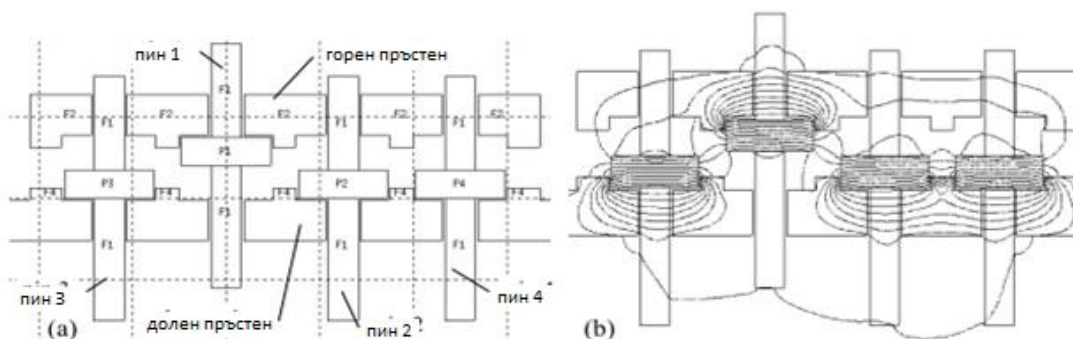
Върху въртящ се пръстен са вградени Брайлови клетки, като този пръстен е покрит с капак и само част от клетките се виждат (3 буквенния дисплей). Всяка Брайлова клетка е съставена от 8 на брой подвижни точки. Информацията, която се чете върху 3 буквенния дисплей се обновява, когато при въртенето на пръстена Брайловите клетки са под капака, тоест не са активни в момента. Идеята на цялата тази конструкция е да се постигнат текстови редове с голяма дължина, както и по-голяма скорост на четене. По-голямата скорост се постига, тъй като не е необходимо както при линейните

Брайлови екрани, когато се стигне края на реда да се отиде в началото и тогава след подадена команда за нов ред да продължи четенето.



Фиг. 1.5 - Концептуален дизайн на Брайлова мишка

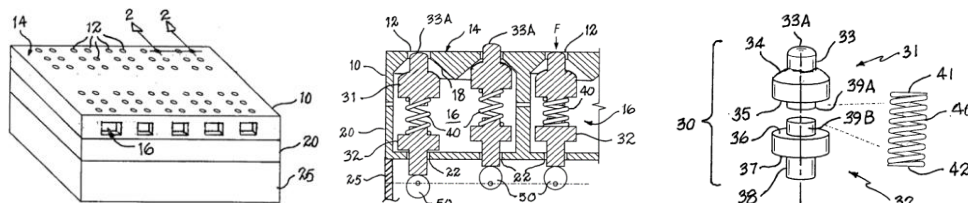
На фиг. 1.6 е показан 2D модел на въртящия се пръстен с вградените в него пинове.



Фиг. 1.6 – а) 2D модел на 4 Брайлови пина; б) магнитни силови линии

1.2.3. Конструкция Ех-3 – Брайлови модули със свиваеми пинове

Показаната на фиг. 1.7 конструкция е част от съществуващ. Подвижните Брайлови точки при тази конструкция се повдигат от колело с изместен център на въртене. Друга особеност е структурата на подвижната част, която е съставена от три основни компонента (32-долна подвижна част, 31-горна подвижна част и 40-пружина между двете части). Пружината между двете части е поставена с цел при прилагане на по-голяма сила на натиск да не се получи повреда в елемент 50 от долната фигура.



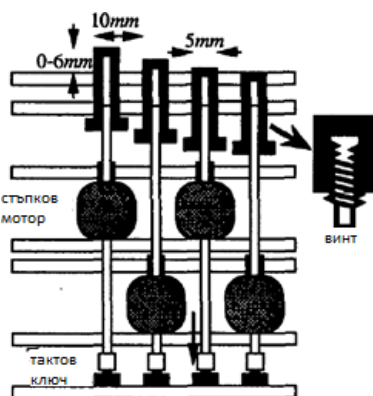
Фиг. 1.7 - Конструкция на свиваеми Брайлови модули

1.2.4. Конструкция Ех-4 – 3D Брайлови екрани

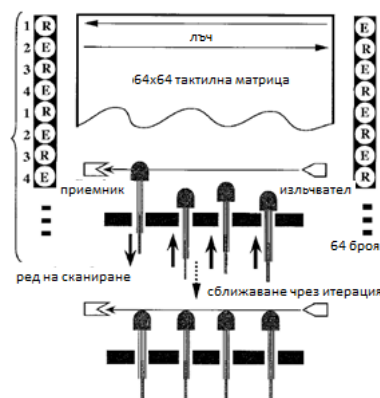
Показаните до тук конструкции са на модули, използвани при 2D Брайлови екрани. Чрез някои от тях може да се представя не само Брайлова азбука, но и двумерни форми и графики. Конструкциите от фиг. 1.8 и фиг. 1.9 могат да представят 3D информация. За целта пиновете (подвижните точки) имат повече от две устойчиви състояния, тоест те изменят

височината си с определена стъпка и по този начин създават 3D форми. Устройството на фиг. 1.8 е изградено от матрица с подвижни точки, разстоянието между, който е 5 mm. Те са задвижвани от стъпкови мотори, които се контролират компютърно.

На фиг. 1.9 е показано подобно устройство, изградено от матрица съдържаща 64x64 точки. В сравнение с предишното стъпката на повдигане на пиновете е много по прецизна (0.1 mm).



Фиг. 1.8 - 3D екран, използващ модули, задвижвани от стъпкови мотори



Фиг. 1.9 - 3D екран с прецизно повдигане на точките

1.3. ИЗВОДИ

За да се направи оценка, доколко дадено решение е подходящо за прилагане в една или друга област, е необходимо да се формулират критерии, спрямо които да се оценят предимствата и недостатъците му. При Брайловите екрани от съществено значение са следните критерии:

- Сила на натиск, която може да издържи подвижния пин преди да промени положението си. Още може да се дефинира като сила на задържане в крайно положение, при повдигнат Брайлов пин;
- Скорост на превключване и брой превключвания в минута;
- Енергоефективност;
- Възможност за постигане на определено разстояние между отделните подвижни точки (пинове). Това е свързано и с габаритите на индивидуалния задвижващ механизъм на всеки от пиновете;
- Износоустойчивост;
- Възможност за ремонт и подмяна на отделни модули;
- Цена на крайното устройство;
- Надеждност;
- Ергономичност – удобство за работа.

Разгледаните до тук електромагнитни модули не покриват всички описани критерии. Някои задвижващи устройства постигат необходимата задвижваща сила но имат високо енергопотребление. При други габаритите са такива, че не позволяват да се постигне необходимата гъстота на подвижните точки. При трети цената на крайното изделие е твърде висока.

От направения анализ и проучване на съществуващите конструкции ясно се вижда, че липсва конструкция с електромагнитно задвижващо устройство, която да покрива всички описани по-горе критерии.

1.4. ЦЕЛ И ЗАДАЧИ НА ДИСЕРТАЦИОННАТА РАБОТА

От направеното проучване на технологиите и съществуващите конструкции, използвани за създаване на Брайлови екрани може да се направи изводът, че няма достатъчно пълни и достоверни компютърни модели, както и разработени прототипи на базата на електромагнитни изпълнителни механизми, които да се използват успешно при такива екрани. Целта на дисертационната работа е разработване и оптимизация на конструкции на електромагнити с постоянни магнити, подходящи за изграждане на Брайлови екрани.

За постигането на целта е необходимо да се решат следните задачи:

1. Анализ на съществуващите технологии и конструкции, използвани при създаването на динамични Брайлови екрани;
2. Моделиране на съществуващи конструкции на електромагнити с постоянни магнити;
3. Разработване и моделиране на нови конструктивни варианти на електромагнити, съобразени с изискванията, които се предявяват към Брайловите екрани;
4. Избор на конструктивен вариант за оптимизация и оптимизиране на конструкцията;
5. Изработване на прототип на новата конструкция на поляризиран електромагнитен Брайлов модул и провеждане на експериментални изследвания с него.

При разработването на дисертационния труд са приложени подходи, базирани на компютърно моделиране и експерименти. За компютърното моделиране е използван методът с крайни елементи за анализ на ососиметрично и тримерно магнитно поле, както и съвременни методи за оптимизация. За експерименталните изследвания, при които са определени статичните и динамичните характеристики на новосъздадените прототипи на поляризираните линейни електромагнитни механизми, са използвани съответни опитни постановки. За осигуряване на необходимото захранване на изследваните модули е разработена електронна схема на „Чакаш импулсен генератор“. Разработена е и схема за захранване и обработка на сигнали от акселерометри с обхвати $\pm 1,5\text{g}$; $\pm 6\text{g}$; $\pm 11\text{g}$, („g“ е земното ускорение). Достоверността на резултатите за скоростта на подвижната част на изследваните прототипи, получена от компютърното моделиране и експериментално чрез акселерометър, се потвърждава от проведен допълнителен експеримент с високоскоростна камера.

2. ТЕОРЕТИЧНИ ИЗСЛЕДВАНИЯ

2.1. ПОДХОД ЗА ИЗЧИСЛЯВАНЕ НА ЕЛЕКТРОМАГНИТНАТА СИЛА

Електромагнитната сила се изчислява на база на резултатите за електромагнитното поле, получени от моделите направени чрез МКЕ. Един от най-разпространените подходи за определянето ѝ е чрез тензор на напрежение на Максвел.

Тензорът на Максвел дава силата за единица площ, в зависимост от магнитното поле по повърхността на разглежданата област. Уравнението за силата има следния вид:

$$d\vec{F} = \frac{1}{2} \left(\vec{B}(\vec{H})_n + \vec{H}(\vec{B})_n - (\vec{B}\vec{H})_n \right), \quad (2.1)$$

където n е направлението на положителната нормала в разглежданата точка. Пълната сила се получава чрез интегриране по повърхност, ограждаща напълно разглежданата област.

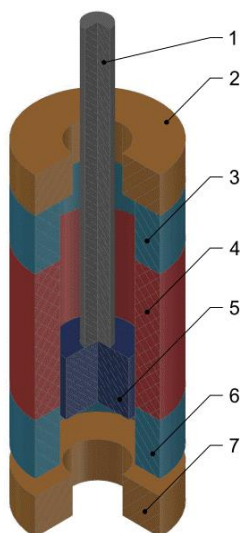
Силата, която се изчислява по този начин, не зависи от пътя на интегриране, ако той огражда напълно разглежданата област и минава през региони с константна магнитна проницаемост. За да се постигнат по прецизни резултати е необходимо размера на крайните елементи да е достатъчно малък.

Софтуерните продукти, които се използват за направа на компютърните симулации имат вграден механизъм за генериране на мрежа от крайни елементи, като същевременно с това следят за качеството на елементите. Например, при използването на триъгълни крайни елементи генераторът на мрежата се стреми да направи елементи с форма най-близка до равностраничен триъгълник.

2.2. РАЗРАБОТВАНЕ НА НОВИ КОНСТРУКТИВНИ ВАРИАНТИ НА ЕЛЕКТРОМАГНИТИ

2.2.1. Конструкция NV-1

За конструкция NV-1, показана на фиг. 2.1, са направени симулации за четири разновидности в зависимост от материала на полюсите и на иглата: N1a-немагнитен материал за полюсите и иглата; N1b-феромагнитна игла и полюси от немагнитен материал; N1c-игла от немагнитен материал и феромагнитни полюси; N1d-феромагнитни полюси и игла.



Основните градивни елементи на вариант NV-1 са:

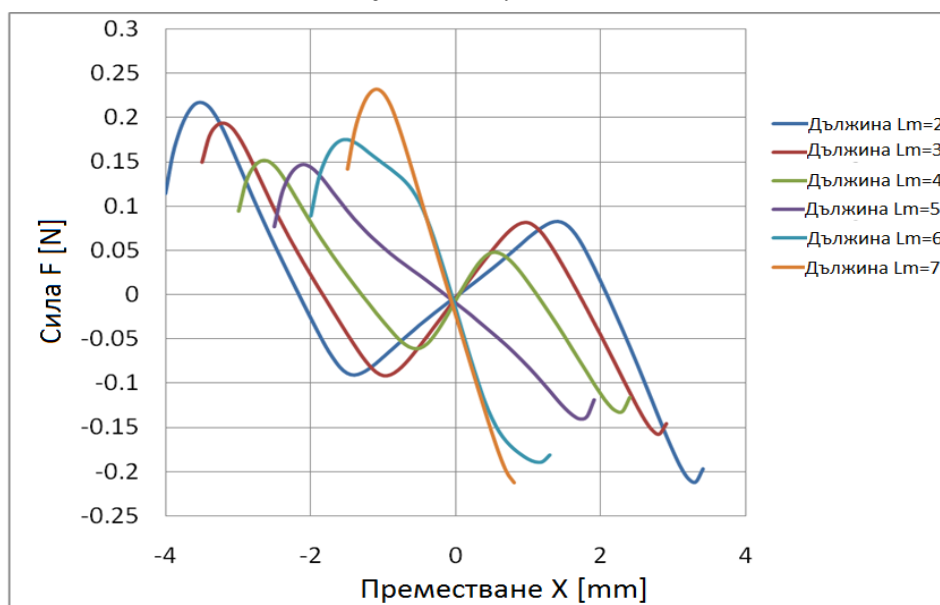
- 1 – ос;
- 2 и 7 – полюси;
- 4 – намотка;
- 3 и 6 – радиални магнити;
- 5 – аксиален постоянен магнит.

Фиг. 2.1 Конструкция NV-1

За моделирането е използван метода с крайни елементи и софтуера FEMM. Решена е ососиметрична задача и е определена силата, действаща върху подвижната част. За автоматизация е използван Lua Script®.

За всички изследвани варианти е извършено моделиране при различни позиции на подвижната част и от получените резултати е формирана характеристиката сила-ход.

При моделирането на 4-те варианта на конструкция NV-1 са получени характеристиките сила-ход. На фиг. 2.2 са дадени само част от характеристиките, останалите са дадени в дисертацията. Всички варианти са изследвани при шест дължини на подвижния постоянен магнит и при токова плътност в намотката 10 A/mm^2 .



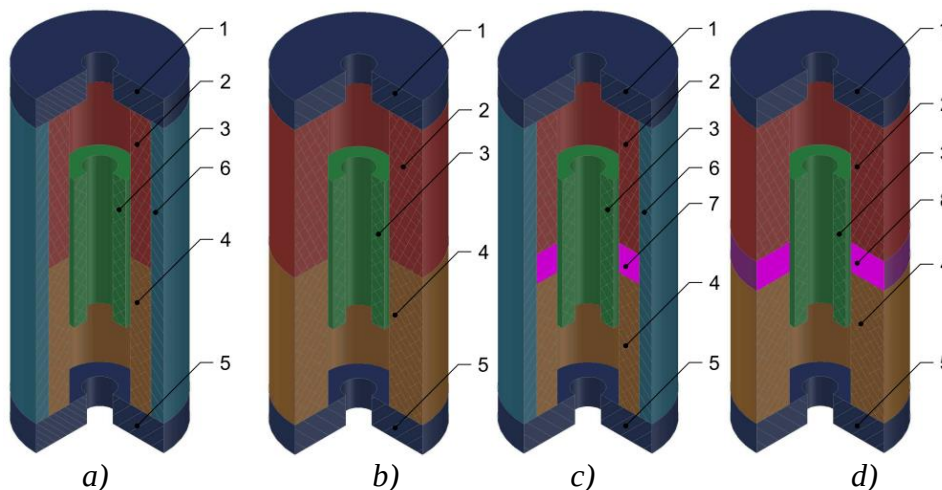
Фиг. 2.2 Характеристики сила-ход за вариант NV-1

От четирите варианта на тази конструкция, двата с немагнитни оси имат симетрични характеристики при условие, че позицията на подвижната част е симетрична спрямо конструкцията. Другите два варианта (с феромагнитни оси) имат асиметрични характеристики. Най-голяма

електромагнитна сила се постига при варианта с немагнитна ос и феромагнитни полюси.

2.2.2. Конструкция NV-2

За разлика от конструкция NV-1, показана на фиг. 2.1, в която присъстват три постоянни магнита и една намотка, в основата на електромагнита (NV-2), стоят две намотки и един постоянен магнит. Изследвани са четири модификации на тази конструкция.



Фиг. 2.3 Конструкция NV-2, а)-вариант N2a; б)-вариант N2b); в)-вариант N2c; д)-вариант N2d (1-горен полюс; 2-горна намотка; 3-постоянен магнит; 4-долна намотка; 5-долен полюс; 6-феромагнитен корпус; 7, 8 – феромагнитен диск)

Принципната конструкция на модификациите на конструкция NV-2 са дадени на фиг. 2.3. При варианти N2a и N2b имаме подвижен постоянен магнит, който се движи между двата феромагнитни полюса, когато намотките са захранени по такъв начин, че да създават магнитен поток в съответната посока.

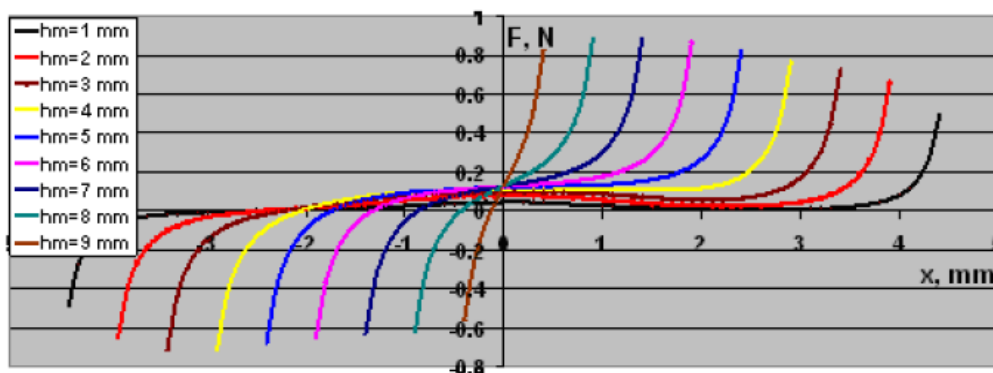
За разлика от N2a и N2b, при варианти N2c и N2d, между двете намотки е монтиран допълнително феромагнитен диск.

Подвижният аксиално намагнитен постоянен магнит е NdFeB и е монтиран към немагнитна ос, която не е показана в конструкцията.

Двете намотки в конструкцията са свързани по такъв начин, че създават противоположно магнитно поле. По този начин, независимо от поляритета на захранването, една от намотките винаги създава магнитен поток съпосочен с потока от постоянния магнит.

Поради симетричността на конструкцията, при моделирането е решена ососиметрична задача, като е използван софтуера FEMM. Чрез езика Lua Script е написан алгоритъм за автоматизация на процеса. Силата е получена чрез тензора на Максвел.

Статичните характеристики сила-ход за един от вариантите са дадени на фиг. 2.4. Моделите са изследвани при различна дължина „ h_m ” на постоянния магнит и фиксирана токова плътност в намотките 20 A/mm^2 .



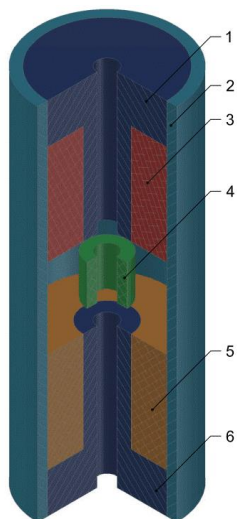
Фиг. 2.4 Статични характеристики сила-ход за вариант N2a, при различни дължини „ h_m “ на постоянния магнит и при токова плътност 20 A/mm^2

Преместването на постоянния магнит е между двата полюса, като началната и крайната точка в симулациите е зададена на 0.1 mm от самия полюс до магнита.

Външният феромагнитен корпус при варианти N2a и N2c не оказва голямо влияние върху характеристиките. Той е от значение при изграждането на матрица от близко разположени модули (както е в случая на Брайловите екрани), тъй като ще намали значително влиянието между съседно разположените модули.

2.2.3. Конструкция NV-3

На база предходно разгледаните две конструкции и получените резултати, е създаден електромагнитен механизъм с аксиален цилиндричен постоянен магнит, чиято конструкция е дадена на фиг. 2.5.



Основните градивни елементи на вариант NV-3 са:

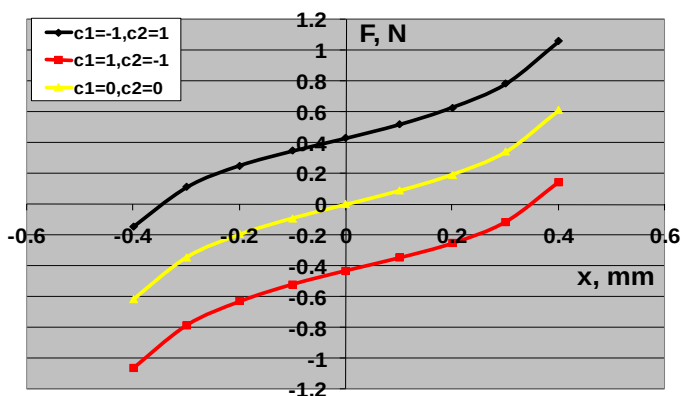
- 1 и 6 – ядра от феромагнитен материал;
- 2 – корпус от феромагнитен материал;
- 3 и 5 – управляващи намотки;
- 4 – постоянен магнит.

Фиг. 2.5 Принципна конструкция NV-3

Двете намотки са свързани по такъв начин, че създават противоположен магнитен поток от двете страни на постоянния магнит. По този начин, в зависимост от поляритета на приложеното захранване, постоянният магнит ще се движи нагоре или надолу. Когато е необходимо да се създаде сила за придвижване на подвижната част нагоре, горната намотка трябва да създава магнитен поток съпосочен с магнитния поток на постоянния магнит. В същото време долната намотка създава противоположен поток и постоянния магнит ще се премести в горно

положение. За да се придвижи в долно положение трябва да се смени поляритета на намотките. Преместването се предава на Брайловите точки чрез използване на немагнитна ос закрепена към постоянния магнит.

Статичните характеристики сила-ход от фиг. 2.6 са получени при различни конструктивни параметри на изследвания електромагнит. Параметрите, които варират са височина на постоянния магнит „ h_m “, въздушна междина „ δ “, височината на намотките „ h_w “ и токова плътност в намотките „ J “. В графиките с „ c_1 “ и „ c_2 “ е означено захранването на намотките. „ $c_1=-1, c_2=1$ “ означава, захранване за сила нагоре; „ $c_1=1, c_2=-1$ “ е захранване за сила надолу; „ $c_1=0, c_2=0$ “ намотките са без захранване, тоест силата се създава само от постоянния магнит.



Фиг. 2.6 Характеристики сила-ход при $h_m=2mm$, $\delta=3mm$, $h_w=5mm$, $J=20A/mm^2$

Получените характеристики за различните модификации на конструкцията NV-3, показват че тази конструкция е подходяща за използване при Брайлов екран. Поради тази причина конструкцията е избрана за по-подробно изучаване, оптимизиране и намиране на динамичните ѝ характеристики.

Конструктивни и други съображения налагат промени в конструкцията на електромагнитното задвижващо устройство NV-3 (фиг. 2.5) и съответно тя придобива вида от фиг. 3.1, чиято аббревиатура е „вариант N3“. Основната разлика е в подвижната част, където са добавени феромагнитни шайби от двете страни на постоянния магнит, също така магнита не е перфориран.

2.3. ИЗВОДИ

От направеното моделиране на съществуващи конструкции на електромагнити се установи, че изследваните електромагнитни модули не покриват критериите, посочени в точка 1.3, свързани със задвижването на Брайловите точки в един Брайлов екран. Поради тази причина са разработени нови конструктивни варианти на поляризирани електромагнитни механизми. Чрез компютърно моделиране са изследвани статичните им характеристики сила-ход при различни геометрични параметри и токова плътност в намотките. От тези резултати са установени параметрите, които силно влияят на характеристиките им.

Основните предимства на новите конструктивни варианти са:

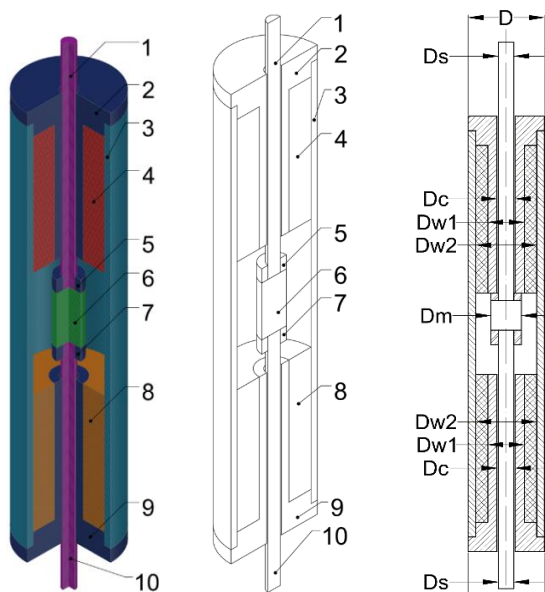
- Постигат необходимата задържаща сила в крайно положение;
- Необходимо е захранване само за времето на превключване от едното в другото крайно положение, което води до ниска консумация на електрическа енергия; (виж Таблица 4.4 в точка 4.4)
- Компактни размери - външен диаметър 5mm., което е предпоставка за постигане на голяма гъстота на пикселите в един Брайлов екран;
- При повреда може да се подмени само съответния модул;
- Ниска цена в сравнение с други технологии, използвани при Брайловите екрани. (виж Таблица 4.4 в точка 4.4)

От новоразработените електромагнитни модули най-подходяща за прилагане, като задвижващ механизъм на точките в Брайловите екрани е конструкция NV-3. Конструктивни и други съображения налагат промени в конструкцията на електромагнитното задвижващо устройство от фиг. 2.38 и съответно тя придобива вида от фиг. 3.1, чиято аббревиатура е „вариант N3“. Основната разлика е в подвижната част, където са добавени феромагнитни шайби от двете страни на постоянния магнит; също така постоянният магнит е плътен.

3. ОПТИМИЗАЦИЯ НА ИЗБРАНИЯ ЕЛЕКТРОМАГНИТЕН МОДУЛ ЗА БРАЙЛОВ ЕКРАН

3.1. ИЗБОР НА КОНСТРУКТИВЕН ВАРИАНТ ЗА ОПТИМИЗАЦИЯ

След разработване на няколко нови конструктивни варианта, които бяха разгледани в предходната глава и резултатите от направените с тях симулации, е избран варианта даден на фиг. 3.1, за който е решена параметрична оптимизационна задача и са изработени прототипи, с които са направени експерименталните изследвания.



Фиг. 3.1 – Конструкция на вариант N3

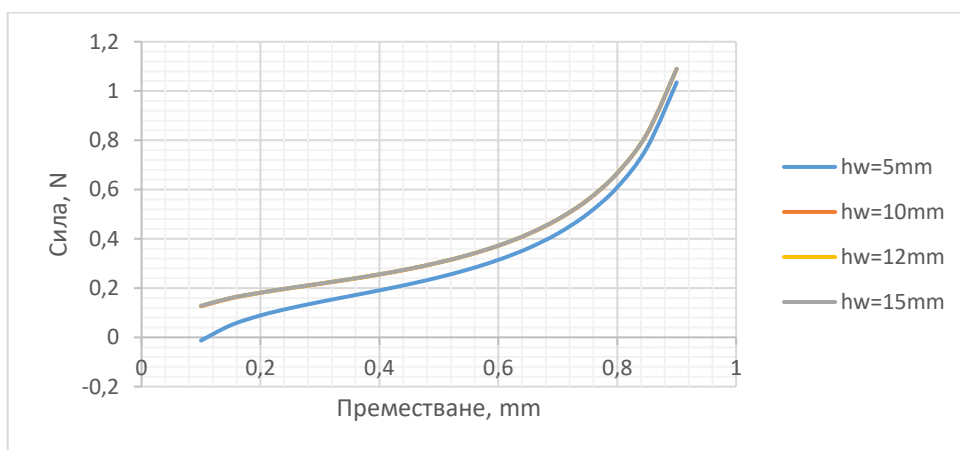
Основните детайли на електромагнитния модул са:

- 1 - игла – подвижна ос, която повдига една Брайлова точка в дисплея;
- 2 - горно ядро;
- 3 - външно ядро(корпус);
- 4 - горна намотка;
- 5 - горен феромагнитен диск (шайба);
- 6 - постоянен магнит;
- 7 - долен феромагнитен диск(шайба);
- 8 - долна намотка;
- 9 - долно ядро; 10 - игла.

Двете намотки са свързани последователно така, че създават магнитен поток в посока, обратна на посоката на магнитния поток на постоянният

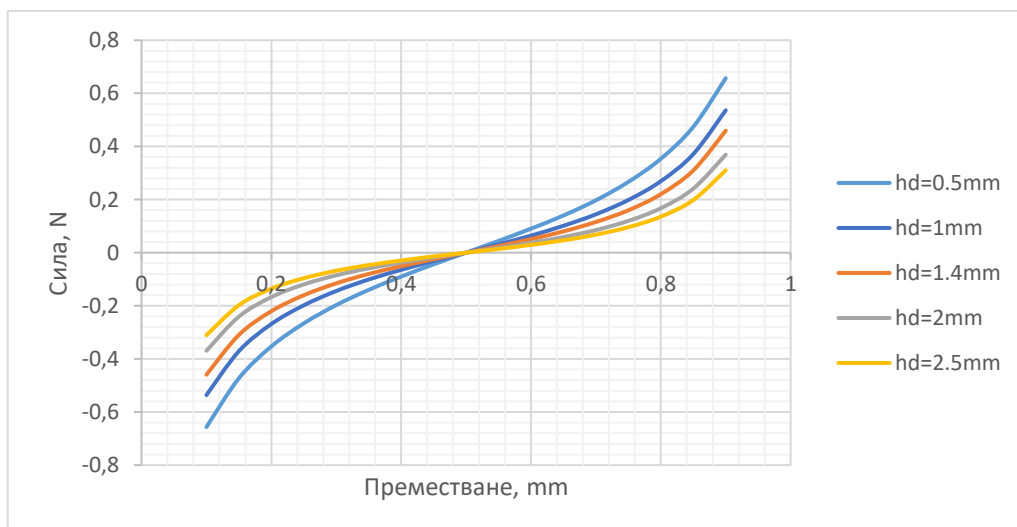
магнит. По този начин в зависимост от поляритета на захранващия източник постоянният магнит ще се премести в горно или долно положение. Когато е нужно преместване нагоре, горната намотка трябва да създаде магнитен поток, съпосочен с потока на постоянния магнит. В същото време долната намотка трябва да създаде поток, противоположен на потока на постоянния магнит. Така постоянният магнит ще се премести в горно положение. Ако е необходимо да се върне обратно в долно положение, то тогава трябва да се обърне полярността на захранващия източник. Това движение се предава на „Брайлова точка“ от дисплея посредством немагнитните игли на модула.

За да се определят геометричните параметри, оказващи влияние върху характеристиките на изследваните модули и съответно да се реши оптимизационна задача, свързана с тях, е направено компютърно моделиране. Резултатите от него са публикувани в статии [П-4, П-7, П-9, П-10]. Част от тези резултати са дадени на фиг. 3.2 и фиг. 3.3.



Фиг. 3.2 – Характеристики сила-ход при различна височина на намотките h_w . ($J=20\text{e6 A/m}^2$; $h_m=2\text{ mm}$; $h_{d1}=h_{d2}=1.4\text{ mm}$.)

От характеристиките сила-ход, показани на фиг. 3.2 става ясно, че височина на намотката до 12 mm. оказва влияние върху характеристиките. Поради по-големия поток на разсейване, намотки с по-голяма височина не оказват влияние върху характеристиките.



фиг. 3.3 – Характеристики сила-ход при различна височина на феромагнитните дискове $h_d=h_{d1}=h_{d2}$. Намотките не са захранени. ($J=0\text{ A/m}^2$; $h_w=10\text{ mm}$; $h_m=2\text{ mm}$)

3.2. ФОРМУЛИРАНЕ НА КРИТЕРИИТЕ ЗА ОПТИМИЗАЦИЯ

Като се има предвид спецификата на приложението (Брайлов екран), за което се разработва това електромагнитно изпълнително устройство, геометричните му параметри могат да бъдат разделени на два вида: постоянни (фиксирани или такива, които не могат да се променят поради технологични или други съображения) и променливи (за тях трябва да се намерят оптимални стойности). В Таблица 3.1 са описани основните геометрични параметри на модула.

Таблица 3.1:

Категория	Геометричен параметър		Стойност	
	Наименование			
Постоянни (фиксирани)	Диаметър на иглата	Ds	1	mm
	Вътрешен диаметър на ядрото	Dc	1.2	mm
	Вътрешен диаметър на намотката	Dw1	2.4	mm
	Външен диаметър на намотката	Dw2	4	mm
	Външен диаметър на модула	D	5	mm
	Диаметър на постоянния магнит	Dm	2	mm
Променливи (подлежащи на оптимизация)	Височина на намотките	hw	От 5 до 15	mm
	Височина на феромагнитните дискове	hd1; hd2	От 0.5 до 2.5	mm
	Височина на постоянния магнит	hm	От 1.5 до 2.5	mm

При моделирането са направени и симулации при различни стойности на токовата плътност $J = 0$ до 20e6, A/m^2 . Високата токова плътност е възможна, тъй като захранването е с импулси и прилагането му за по-малко от 20ms е достатъчно за превключването на модула.

Основно изискване към това електромагнитно задвижване е задържащата сила F_h , създавана от постоянния магнит в горно положение да е по-голяма от 0.3, N, при условие, че намотките не са захранени. От това изискване се определя и целевата функция, а именно – максимална задържаща сила в крайно положение. Изборът на параметри за оптимизацията се базира на получените резултати от моделирането описани в точка 3.1 и на специфични изисквания към Брайловите екрани.

Параметрите на оптимизация и техните ограничения са следните:

- $F_s > 0.1, \text{ N}$ - начална сила при захранени намотки (1)
- $0.3 < F_h < 0.6, \text{ N}$ - задържаща сила без захранване (2)
- $5 < h_w < 15, \text{ mm}$ - височина на намотките (ядрата) (3)
- $0.5 < h_{d1} < 2.5, \text{ mm}$ - височина на горния диск (4)
- $0.5 < h_{d2} < 2.5, \text{ mm}$ - височина на долния диск (5)

С използването на постоянен магнит се постига висока енергоефективност, тъй като електроенергия се консумира само за времето на превключването от едното в другото устойчиво състояние.

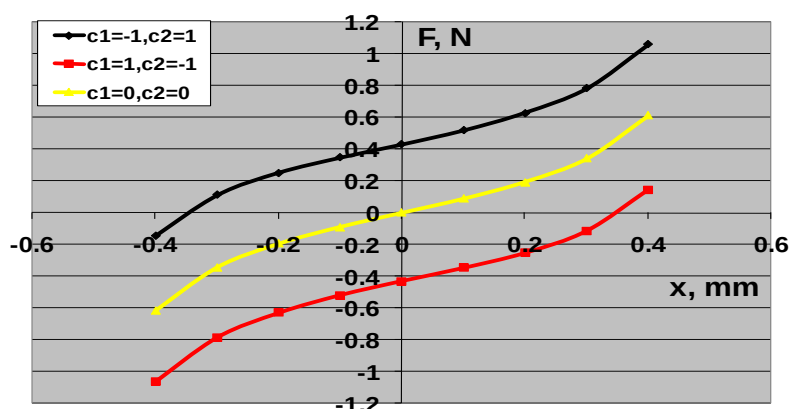
За компютърното моделиране е използван метода с крайни елементи и софтуерните пакети FEMM и COMSOL Multiphysics. За автоматизиране на симулационните процеси в FEMM моделите е разработен Lua Script, а

при COMSOL моделите е използвана опцията „Parametric Sweep” и вградения модул за оптимизация. Този модул разполага с няколко стохастични и детерминистични многопараметрични методи за оптимизация. Сред тях са: Системно търсене(Coordinate search); Монте-Карло(Monte-Carlo); Нелдер-Мед(Nelder-Mead) и други.

3.3. РЕШАВАНЕ НА ОПТИМИЗАЦИОННАТА ЗАДАЧА

3.3.1. Подход 1 - Оптимизация чрез МКЕ и вторични модели

Статичното електромагнитно поле на конструкцията е моделирано чрез метода с крайни елементи и софтуера FEMM. Електромагнитната сила, действаща върху подвижната част е определена чрез тензора на Максвел. От съществено значение са т. нар. задържаща сила и сила на тръгване. Задържащата сила се създава от постоянния магнит в едно от двете крайни положения при условие, че намотките не са захранени. Силата на тръгване е силата, която се създава когато подвижната част е в горно или долно положение и намотките са захранени, така че да създадат магнитен поток, който да предизвика преместване в другата посока. Типови статични характеристики са дадени на фиг. 3.4. За нулева точка е приета точката, в която подвижната част е на еднакво разстояние от горното и долното ядро.



Фиг. 3.4 – Характеристики сила-ход на конструкцията за оптимизация

Параметрите, които се променят в определени граници, така че да се намери оптималното решение са:

- Височина на горното и долното ядро - h_w ,
- Височина на феромагнитните дискове - h_d ,
- Височина на постоянния магнит - h_m ,
- Токова плътност в намотките - J .

При прилагането на метода с вторични модели при оптимизацията се цели от модела с компютърните изчисления да се създаде регресионен модел, който след това да се изследва за намиране на екстремум. Блокова схема, показваща последователността от стъпки при реализирането на подхода е дадена на фиг. 3.5.

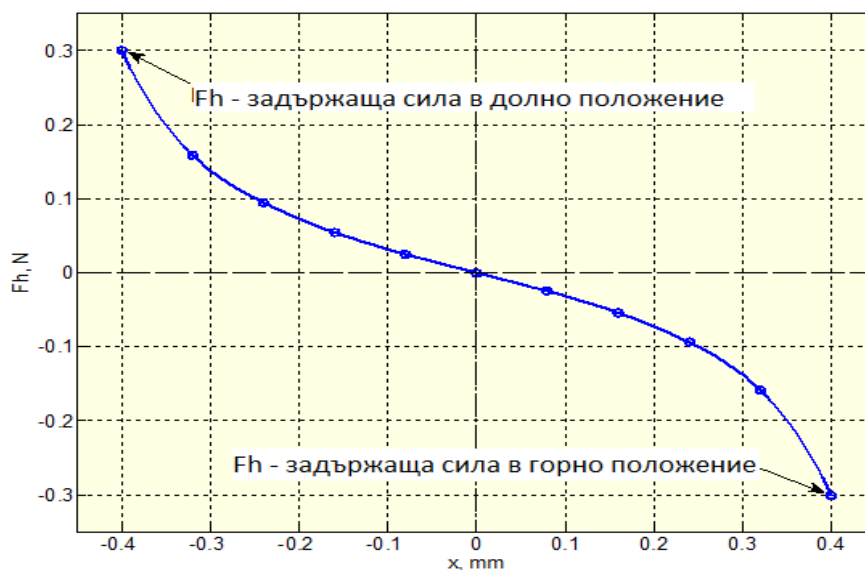


Фиг. 3.5 – Блокова схема на оптимизационния процес

За решаване на оптимизационната задача е приложен метода на последователно квадратично програмиране (Sequential Quadratic Programming) в средата на MATLAB. В оптимизационния тулбокс на MATLAB е предоставена функцията `fmincon()`, която прилага този метод и позволява задаване на линейни и на нелинейни функционални или областни ограничения. Резултатите за геометричните размери от оптимизацията са:

$$hw_{opt} = 10 \text{ mm}, \quad hm_{opt} = 2 \text{ mm}, \quad hd_{opt} = 1.44 \text{ mm},$$

Получените оптимални размери са заложили като входящи параметри във FEMM модела и след решаването му са определени статичните характеристики сила-ход на оптимизирания електромагнитен модул, които са показани на фиг. 3.6.



Фиг. 3.6 – Характеристика сила ход на оптимизирания електромагнит, при намотки без захранване; действа само сила на задържане.

3.3.2. Подход 2 - Оптимизация чрез метода Nelder-Mead в COMSOL

Този подход е реализиран чрез използване на метода „Nelder-Mead“, вграден в оптимизационния модул в COMSOL Multiphysics, даващ възможност да се извърши директен анализ с МКЕ и използването на резултатите от него в един и същи модел за намиране на оптималните стойности на търсените параметри. Описанието на използвания метод е дадено в настоящата точка. Магнитното поле е моделирано чрез МКЕ и софтуера COMSOL Multiphysics 4.3a. Решена е ососиметрична задача. Разработен е и 3D модел.

В предходната точка са намерени оптималните геометрични размери на конструкцията, като феромагнитните шайби, разположени от двете страни на постоянния магнит са с еднаква височина. Това е така, тъй като търсената максимална задържаща сила е и за двете крайни положения. В реалния Брайлов екран от съществено значение е задържащата сила само в крайно горно положение, тоест когато Брайловия пин е повдигнат. Поради тази причина с настоящата оптимизация се търси вариант, при който да се намали задържащата сила в долно положение за да се повиши допълнително енергоефективността на модула. Това може да се реализира при използване на феромагнитни дискове с различна височина.

Целевата функция тук е максималната задържаща сила в крайно горно положение на подвижната част, при незахранени намотки. Параметрите на оптимизация и въведените ограничения са:

- $0.3 < F_h < 0.6$, N - задържаща сила без захранване (1)
- $1 < h_{d1} < 2$, mm - височина на горния диск (2)
- $1 < h_{d2} < 2$, mm - височина на долния диск (3)

За оптимизацията се използва софтуера COMSOL Multiphysics 4.3a. Чрез вградения в него оптимизационен модул се извършва директна оптимизация на основната задача. При всяка следваща изчислителна стъпка се определят новите стойности на параметрите на оптимизация и за тях се прави анализ на полето чрез МКЕ. Изчислява се нова стойност на целевата функция и след това процедурата се повтаря до намиране на екстремум.

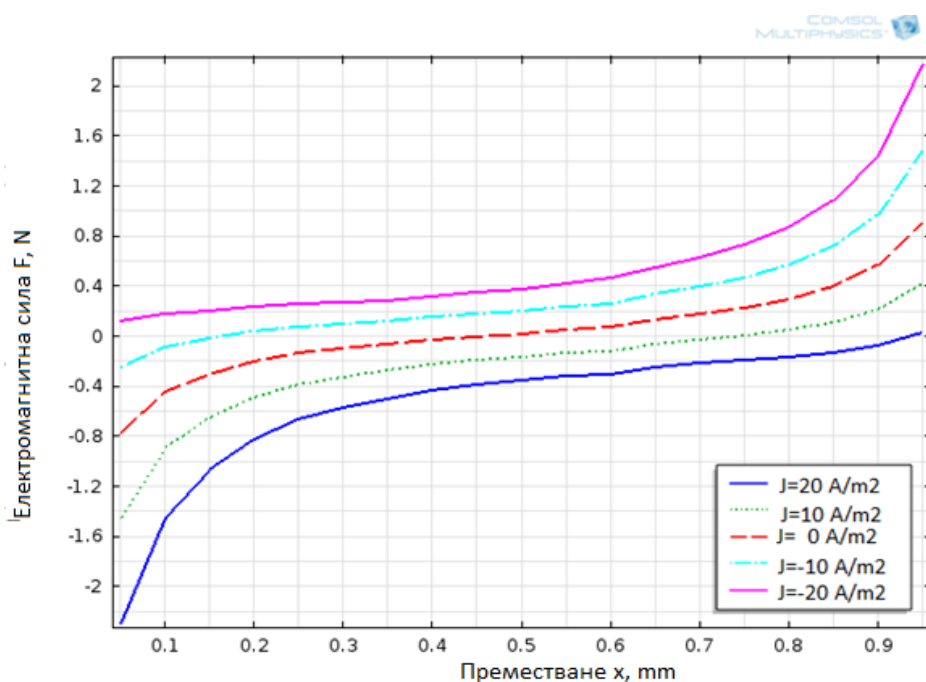
Във версия 4.3a на използвания софтуер се предлагат три метода за решаване на оптимизационни задачи: Системно търсене (Coordinate search); Монте-Карло (Monte-Carlo); Нелдер-Мид (Nelder-Mead).

Nelder-Mead методът се базира на симплекс от $N+1$ точки, където N е броят на параметрите на оптимизация. Методът не използва производни на целевата функция. При този метод се цели подобряване на най-лошата точка в симплекс от отражения. Имплементацията на метода в COMSOL включва рестарт на процедурата в случая, когато симплекс формата дегенерира (тоест свива се по направление). Освен това в софтуера се следят долната и горната граница на параметрите на оптимизация, чрез подходящо ограничаване на дължината на отраженията.

Резултатите за височината на феромагнитните дискове, получени от оптимизационната задача са:

- $h_{d1}=1$ mm – височина на горния феромагнитен диск;
- $h_{d2}=1.4$ mm – височина на долния феромагнитен диск.

Оптималните височини са зададени като входни параметри в COMSOL и са намерени статичните характеристики. Те са показани на фиг. 3.7.

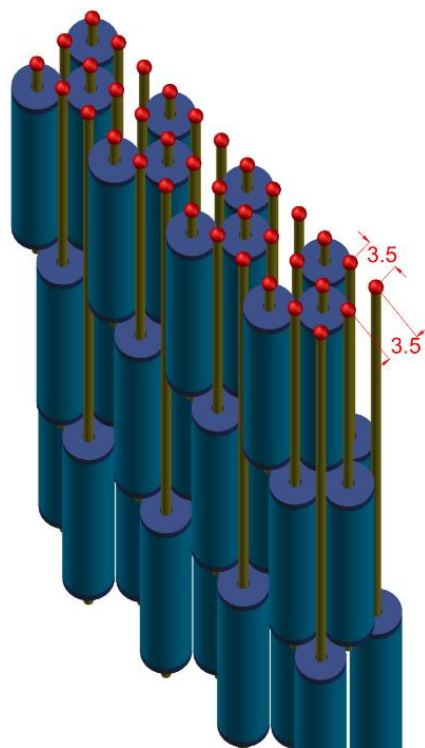


Фиг. 3.7 – Характеристики сила-ход на оптимизирания вариант при различна токова плътност J A/m². ($hw=10$ mm; $hm=2$ mm; $hd1=1$ mm; $hd2=1.4$ mm.)

3.4. ДИНАМИЧНИ ХАРАКТЕРИСТИКИ НА ОПТИМИЗИРАНИЯ ЕЛЕКТРОМАГНИТЕН МОДУЛ

Принципната конструкция на поляризиращия електромагнитен модул, използвана за направа на компютърен модел за определяне на динамичните характеристики е дадена на фиг. 3.1. На фиг. 3.8 са дадени няколко реда от примерна матрица на Брайлов екран с използване на оптимизирания електромагнитен модул.

Разработени са компютърни модели за определяне на динамичните характеристики на изследваната електромагнитна конструкция. От моделите са определени токът през намотките във времето, както и скоростта на движение на подвижната част от модула.



Фиг. 3.8-Част от Брайлов екран при използване на електромагнитния модул

За моделирането е използван MKE и софтуера COMSOL Multiphysics. Направен е динамичен модел, в който се разглеждат едновременно електрическа верига, магнитно поле и механична задача. За мрежата от крайни елементи се използва „Moving Mesh“ интерфейсът.

В софтуера, при моделирането са използвани следните уравнения:

- За магнитното поле:

$$\sigma \frac{\partial A}{\partial t} + \nabla \times H = J e; \quad B = \nabla \times A, \quad (1)$$

където A -магнитният вектор потенциал; $J e$ -токовата плътност; σ -електрическата проводимост; B -индукцията.

- Електрическа верига:

$$u = Ri + \frac{d\Psi}{dt}, \quad (2)$$

където u -захранващо напрежение; R -съпротивление на намотката; Ψ -потока през намотката; i -тока през намотката; t -времето.

- Механичната задача:

$$\rho \frac{d^2 u}{dt^2} - \nabla \cdot \sigma = F_v, \quad F_v = \frac{F_{tot}}{V},$$

$$\sigma = J^{-1} F S F^T, \quad F = (I + \nabla u), \quad J = \det(F), \quad (3)$$

където u -преместване; F_v – сила действаща върху единица обем; F_{tot} -електромагнитната сила, действаща върху подвижната част на електромагнита; V -обем на подвижната част; ρ -налягане; σ -натоварване.

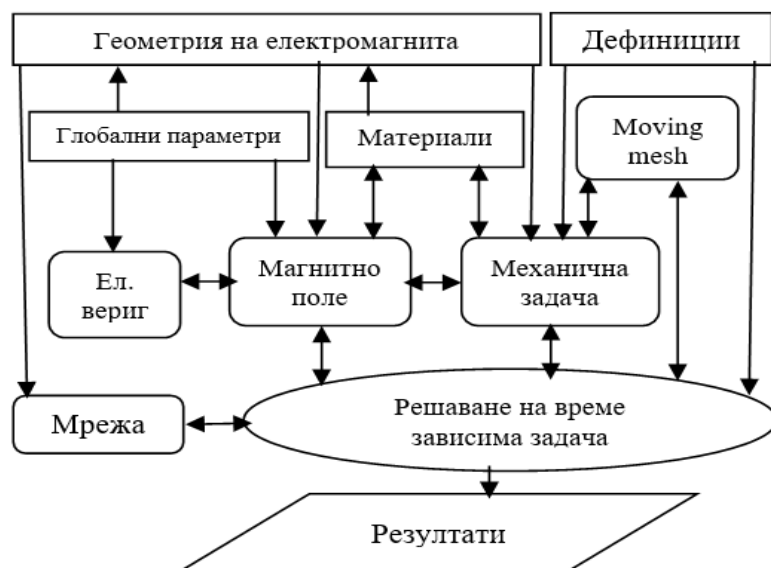
Основните стъпки (части) при изграждането на динамичен симулационен модел в COMSOL за изследване на електромагнита са:

- Дефиниции – тук се въвеждат параметрите, които се използват при създаването на геометрията на конструкцията, както и параметрите за сонди и контактни двойки. Под „сонди“ се има предвид, програмните структури, чрез които става възможно отчитането на стойностите не търсената величина в дадена точка или в дадено пространство. Контактна двойка е дефиниция, чрез която се въвежда ограничения във модела, за повърхнините, които контактуват по време на движението в механичната задача;
- Геометрия – тук се дефинират физическите размери на всяка част от електромагнита. За всички са използвани параметри за да се правят по-лесни бъдещи корекции;
- Материали – параметрите на всички използвани материали се въвеждат тук. Също така за всяка геометрична част се задава от какъв материал е направена;
- Електрическа верига – тук се дефинира захранващата верига;
- Магнитно поле – в тази секция се дефинират параметрите на магнитното поле и се изчислява електромагнитната сила. Резултатите за електромагнитната сила се съхраняват и се използват като натоварване (сила действаща върху подвижната част) в механичната;
- Механична задача – Изчислената електромагнитна сила от горната стъпка се използва като натоварване (сила) върху подвижната част. Също така се въвеждат някои ограничения, като контактни двойки;

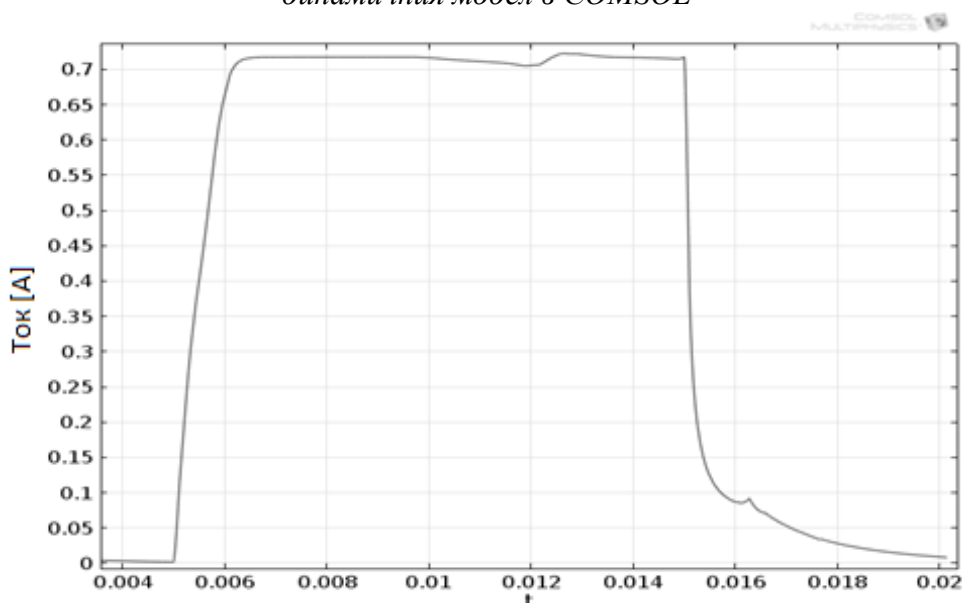
- „Moving mesh“ интерфейс – тук се дефинират част от геометрията, които са подвижни. Тази секция е свързана с механичната задача;
- Мрежа – задават се параметри на мрежата от крайни елементи;
- Времева зависима задача Time dependent study – дефинира се времето за което се изследва поведението на модула.

На всяка стъпка в направения модел се намира решение за електромагнитното поле, последвано от промяна на резултатите в механичната задача, тъй като електромагнитната сила действа като товар в механичната задача и съответно предизвиква преместване на подвижната част. Поради тази причина електромагнитната и механичната задача са свързани при всяка времева стъпка.

На фиг. 3.9 е дадена блокова схема показваща последователността на работа на динамичния модел в COMSOL, а на фиг. 3.10 – характеристиката ток-време, получена от динамичния модел в COMSOL.



Фиг. 3.9 – Блокова схема демонстрираща връзката между отделните интерфейси в динамичния модел в COMSOL



Фиг. 3.10 – Характеристиката ток-време, получена в динамичния COMSOL модел.

По-съществените резултати за динамичните характеристики са сравнени с експериментално получените в следващата глава и поради тази причина не са показани на самостоятелни фигури в тази точка.

3.5. ИЗВОДИ

След направата на всички необходими симулации и анализ на резултатите, за променливите геометрични параметри бяха получени следните оптимални стойности, които ще се използват при изработката на поляризиращия електромагнит за Брайлов екран:

- Височина на намотките $h_w = 10 \text{ mm}$;
- Височина на феромагнитните дискове $h_{d1} = 1 \text{ mm}$, $h_{d2} = 1.4 \text{ mm}$;
- Височина на постоянния магнит $h_m = 2 \text{ mm}$.

Получените от оптимизацията резултати показват, че използването на феромагнитни дискове с различна височина от двете страни на постоянния магнит, подобрява характеристиките на електромагнитния модул.

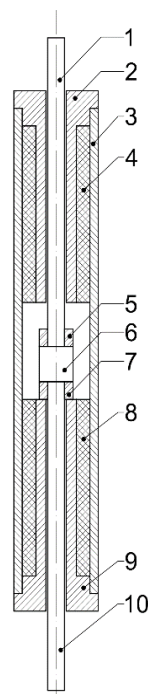
Оптимизираният електромагнит изпълнява изискванията за задвижващо устройство, което може да се използва при Брайлови екрани. В следващата глава от дисертацията са представени резултати от проведени експериментални изследвания с прототипи на електромагнита, потвърждаващи резултатите от симулациите.

4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИ ИЗСЛЕДВАНИЯ

4.1. ОПИСАНИЕ НА ЕКСПЕРИМЕНТА

На фиг. 4.1 е показана конструкцията и външният вид на изследвания прототип на електромагнитния модул с описание на всички основни елементи. Принципът му на работа е описан в предходните глави на дисертационната работа.

За определяне на динамичните му характеристики са проведени експериментални изследвания чрез използване на акселерометър и високоскоростна камера. Резултатите са сравнени с резултатите, получени от компютърните модели за динамичните характеристики на електромагнита.



Основни елементи:

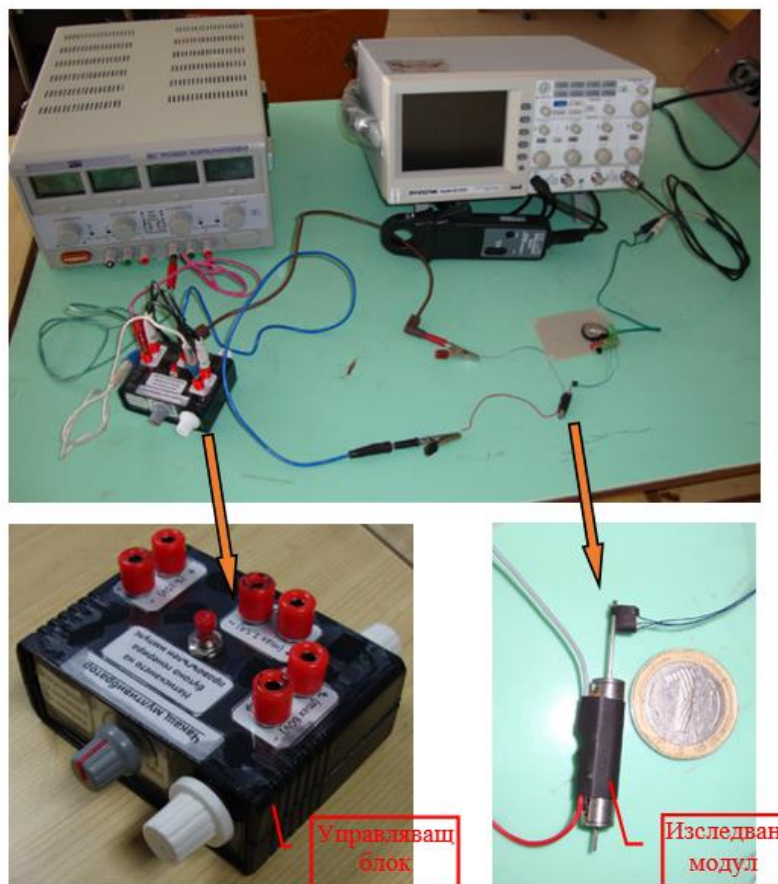
- 1- подвижна ос;
- 2 и 9 – горно и долно ядра;
- 3- корпус;
- 4 и 8 – горна и долна намотка;
- 5- горен феромагнитен диск;
- 6 - постоянен магнит;
- 7- долен феромагнитен диск;
- 10 - подвижна ос.



Фиг. 4.1 – Конструкция и външен вид на прототип на електромагнитния модул.

4.1.1. Експериментално изследване чрез акселерометър

За проверка на коректността на направените компютърни модели е необходимо да се извършат и експериментални изследвания с прототипи на съответното устройство. Снимка на опитната постановка е дадена на фиг. 4.2. За реализирането на опитната постановка се използва специално разработен за целта управляващ модул и сензори с висока прецизност.



Фиг. 4.2 – Снимка на опитната постановка с акселерометър и токова сонда

Блоковата схема на експерименталната постановка е показана на фиг. 4.3. Скоростта на движение на подвижната част се получава от ускорението, отчетено чрез акселерометъра. Изменението на тока във времето в намотката по време на движението се отчита от токовата сонда.



Фиг. 4.3 – Блокова схема на опитната постановка с акселерометър и токова сонда

4.1.2. Експериментално изследване чрез високоскоростна камера

При провеждането на експеримента е използвана високоскоростна камера „MEMRECAM HX-6“, чийто основни характеристики са дадени на фиг. 4.4. Тя има два основни режима на работа - „режим висока резолюция“ и „режим висока скорост“. Те позволяват по-прецизното ѝ използване в най-различни типове изследвания и приложения.

MEMRECAM HX-6 High Speed Mode		
Max Res (pixels)	1280 X 960	
Optical Format	35.20 mm	
fps @ Max Res	3,840	
	Mono	Color
ISO Rating	40,000	8,000

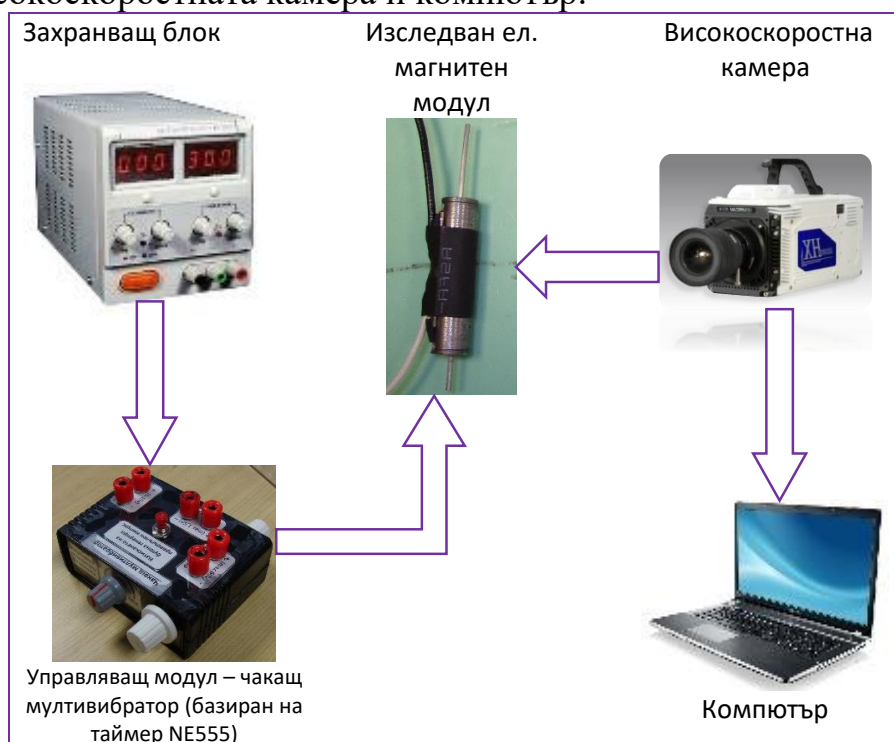
MEMRECAM HX-6 High Resolution Mode		
Max Res (pixels)	2560 X 1920	
Optical Format	35.20 mm	
fps @ Max Res	1,000	
	Mono	Color
ISO Rating	10,000	2,000



Фиг. 4.4 – Основни характеристики и външен вид на камера MEMRECAM HX-6.

На фиг. 4.5 е показана блоковата схема на опитната постановка. За нейната реализация и за провеждането на експеримента са използвани:

- Лабораторен захранващ блок, позволяващ регулиране на изходното напрежение и ток;
- Управляващ блок – разработен специално за използване с изследваните електромагнитни модули. Основни елементи в реализираната схема са таймер NE555 и мощен краен транзистор, през който се осъществява захранване към изследваното устройство. Възможно е и регулирането на продължителността на захранващия електрически импулс;
- 10 броя прототипи на изследвания електромагнит;
- Високоскоростната камера и компютър.



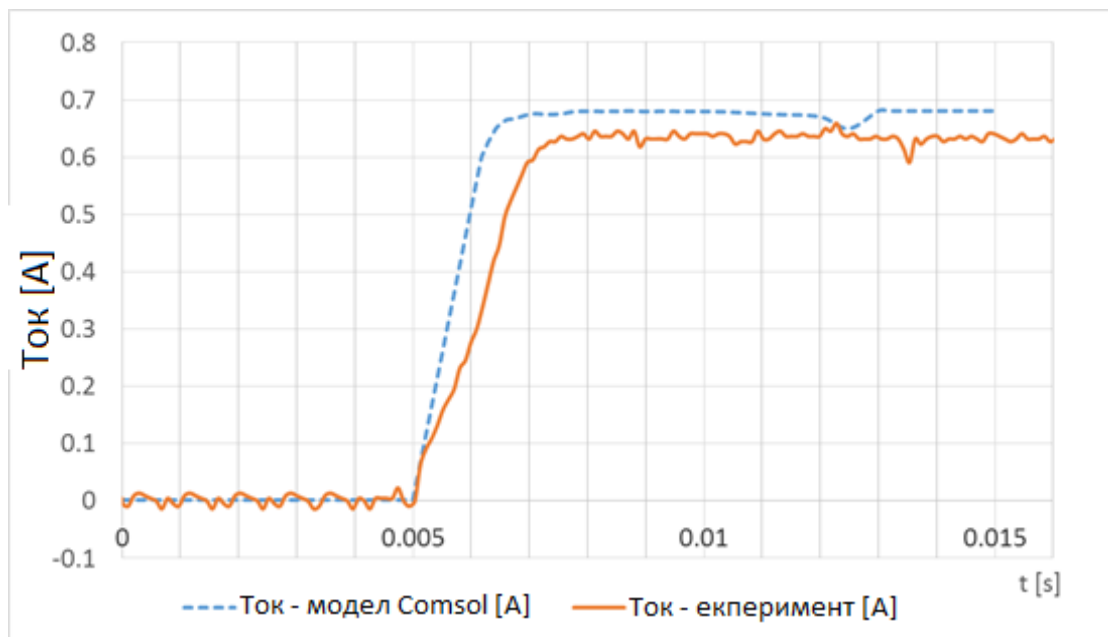
Фиг. 4.5 – Блокова схема на опитната постановка с високоскоростна камера

След поставянето на подходящ маркер върху подвижната ос на модула, така че да се осигури правилната работа на високоскоростната камера, са направени по два опита (в двете посоки на преместване – от долно положение в горно и обратно) с 10-те прототипа на изследвания електромагнит за Брайлов екран.

При провеждането на експеримента данните от камерата се прехвърлят автоматично към компютър, където се обработват в подходящ за представяне вид.

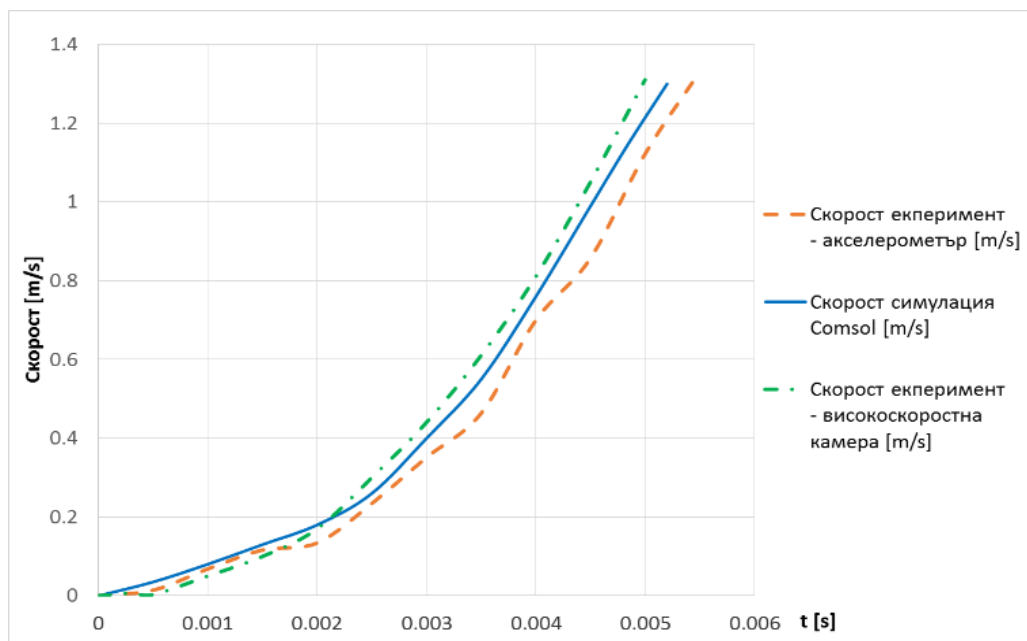
4.1.3. Сравнение на резултати от компютърно моделиране и проведените експерименти

На фиг. 4.6 е визуализирано изменението на тока във времето през намотките на един от изследваните прототипи. Сравняването на резултатите за тока, получен експериментално при изследване чрез токова сонда и тока, получен при компютърно моделиране на динамичните характеристики, показва че характерът на изменението на тока е един и същ. Максималната разлика при двете изследвания е в границите на 13%.



Фиг. 4.6 – Изменение на тока през намотката на изследвания прототип, получен от компютърните симулации и от експеримента

На фиг. 4.7 са показани резултатите за скоростта на подвижната част на един от изследваните електромагнити, получени експериментално по два различни метода (с акселерометър и чрез високоскоростна камера) и резултатите от моделирането по метода с крайни елементи. От графиката става ясно, че и по трите метода характеристиките са сходни, като изследваната величина достига една и съща максимална стойност (1,31 m/s). Максималното отклонение в резултатите от компютърното моделиране и експериментално получените, по отношение на времето за движение е в границите на 4%.



Фиг. 4.7 – Изменение на скоростите, получени от моделирането и експериментално определените чрез акселерометър и чрез високоскоростната камера

4.2. ИЗВОДИ

Направените експериментални изследвания с високоскоростната камера на прототипите на поляризиращия електромагнитен механизъм потвърждават получените резултати от компютърните модели, направени в COMSOL, както и достоверността на експерименталните резултати, получени с помощта на акселерометъра.

Разликите в резултатите от трите вида изследвания се дължат на натрупване на грешка от мрежата с крайни елементи в компютърните модели и от липсата на стабилизатор на напрежение в батерийното захранване на акселерометъра.

5. ПОСТИГНАТИ РЕЗУЛТАТИ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

5.1. АНАЛИЗ НА ПОЛУЧЕНИТЕ РЕЗУЛТАТИ ОТ ТЕОРЕТИЧНИТЕ ИЗСЛЕДВАНИЯ И ЕКСПЕРИМЕНТИТЕ

От резултатите, получени от компютърното моделиране и проведените експерименти могат да се направят следните обобщения:

- Намаляването на височината на феромагнитните дискове, разположени от двете страни на постоянния магнит, позволява да се получи по-голяма задържаща сила в крайно положение, когато намотките не са захранени. Трябва да се има предвид, че с намаляване на височината на феромагнитните дискове, електромагнитната сила, необходима за преместване на подвижната част от долно в горно положение и обратно, нараства.
- При увеличаването на височината на феромагнитните дискове, освен че се намалява силата на задържане, също така се намалява и стръмността на характеристиките.

- Промяната на ъгъла на полюсите [П-5] оказва негативно влияние върху задържащата сила в крайно положение, но води до линеаризиране на характеристиките сила-ход на модула. Вариантите с ъгъл на полюсите 60 градуса имат почти линейни характеристики.
- Увеличаването на височината на намотките оказва голямо влияние върху характеристиките. Това влияние е силно изразено до височина на намотките около 10 mm. По-нататъшното увеличаване на височината им не води до значителни промени в характеристиките на модула, тъй като разсейването на магнитния поток е по-голямо (получава се шунтиране на потока поради сравнително малкия радиус на модула в сравнение с височината му).
- Увеличаване на височината на постоянния магнит позволява да се получи по-голяма задържаща сила, но също така води до намаляване на електромагнитната сила в крайно положение, тоест за да се осъществи преместване ще е необходим по-голям управляващ ток.
- По-големия ход на подвижната част влошава линейността на характеристиките.
- В някои от изследваните варианти силата на тръгване е отрицателна, тоест те няма да могат да придвижат подвижната си част от долно в горно положение и обратно.
- Ако се промени симетрията на подвижната част, тоест височината на горния феромагнитен диск се намали за сметка на височината на долния феромагнитен диск, може да се постигне по-голяма задържаща сила в горно положение за сметка на задържащата сила в долно положение. Това е благоприятно условие, което способства за допълнително намаляване на използваната електрическа енергия за превключване на модула от долно в горно положение, при условие, че се използва прецизно импулсно захранване.

Извършените изследвания (компютърно моделиране и експериментални измервания) доказват, че конструкцията с външен диаметър 5 mm, при минимална дължина на управляващите намотки от 10 mm и височина на постоянния магнит 2 mm, притежава необходимите задвижващи и задържащи сили за осигуряване на работоспособността ѝ, при използването ѝ в Брайлов екран.

5.2. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

От разработения дисертационен труд могат да се обобщят следните научни и научно-приложни приноси:

- Направен е анализ на технологиите, използвани при разработка на задвижващите устройства в Брайловите екрани;
- Извършено е проучване и моделиране на съществуващи конструкции на поляризирани електромагнити, използвани при разработването на Брайлови екрани;

- Разработени са компютърни модели на базата на метода с крайни елементи на нови конструктивни варианти на електромагнити с вградени постоянни магнити за Брайлов екран;
- Изследвани са магнитното поле и електромеханичните характеристики на електромагнитите;
- Чрез компютърно моделиране е определена оптималната конструкция на електромагнитния модул с вграден постоянен магнит и с повишена енергийна ефективност спрямо неутрален електромагнит за конкретно приложение (Брайлов екран);
- Изработени са прототипи на оптимизираната конструкция на електромагнитното задвижващо за приложение в Брайлов екран;
- Разработен е и е реализиран електронен блок за управление на работата на изследваните прототипи;
- Проведени са експериментални изследвания с изработените прототипи на електромагнит;
- Направен е сравнителен анализ на резултатите от компютърното моделиране и експериментално получените резултати от изработения прототип.

ПУБЛИКАЦИИ ВЪВ ВРЪЗКА ДИСЕРТАЦИЯТА

- II-1.** Yatchev I., Hinov K., Balabozov I., Gueorgiev V., Karastoyanov D., “Finite element modeling of electromagnets for Braille screen”, 10-th International Conference on Applied Electromagnetics - PES 2011, September 25-29, 2011, Nis, Serbia
- II-2.** Yatchev I., Hinov K., Balabozov I., Krasteva K., “Static Force Characteristics of Electromagnetic Actuators for Braille Screen”, Facta Universitatis (NIS) ser.: Elec. Energ. vol. 24, no. 2, August 2011, 157-167
- II-3.** Yatchev I., Hinov K., Gueorgiev V., Karastoyanov D., Balabozov I., “Force characteristics of an electromagnetic actuator for Braille screen”, International Conference - ELMA 2011, October 21-23, 2011, Varna, Bulgaria
- II-4.** Balabozov I., Yatchev I., Hinov K., Karastoyanov D., “Influence of different factors on the static force characteristics of a permanent magnet linear actuator for braille screen.”, XVII-th International Symposium on Electrical Apparatus and Technologies - SIELA 2012, May 28-30, 2012, Bourgas, Bulgaria
- II-5.** Balabozov I., “Influence of the pole angle on the static force characteristics of a permanent magnet actuator for Braille Screen.”, 6-th International PhD Seminar on Computational electromagnetics and bioeffects of electromagnetic fields – CEMBEF 2012, June 28-30, 2012, Novi Sad, Serbia
- II-6.** Yatchev I., Balabozov I., Hinov K., Gueorgiev V., Karastoyanov D., “Optimization of Permanent Magnet Linear Actuator for Braille Screen.”, 15-

th International IGTE Symposium on Numerical Field Calculation in Electrical Engineering, September 16-19, 2012, Graz, Austria

- П-7.** Хинов К., Балабозов Й., Георгиев В., Ячев И., Карастоянов Д., “Изследване влиянието на някои геометрични фактори върху характеристиките на поляризиран изпълнителен електромагнит за Брайлов екран.”, IV-та Научна конференция ЕФ, Септември 28-01, 2012, Созопол, България, том 2, стр. 405-411
- П-8.** Balabozov I., “Optimization of ferromagnetic discs in permanent magnet linear actuator for Braille screen.”, 7-th International PhD Seminar on Computational electromagnetics and bioeffects of electromagnetic fields – CEMBEF 2013 August 28-31, 2013, Niš, Serbia
- П-9.** Yatchev I., Balabozov I., Hinov K., Gueorgiev V., Karastoyanov D., “Influence of different geometric parameters on the static force characteristics of an electromagnetic actuator for Braille screen”, International Symposium on Theoretical Electrical Engineering – ISTET 2013, June 24-26, 2013, Pilsen, Czech Republic
- П-10.** Хинов К., Балабозов Й., Ячев И., “Влияние на несиметрии в конструкцията върху задвижващата сила на електромагнит за Брайлов дисплей.”, V-та Научна конференция ЕФ, Септември 02-05, 2013, Созопол, България

ЗАЯВКИ ЗА ПАТЕНТИ СВЪРЗАНИ С ДИСЕРТАЦИЯТА

1. Карастоянов Д., Ячев И., Хинов К., Балабозов Й., Брайлов дисплей, заявка за патент на РБ, рег. № 111360 от 5.12.2012.
2. Карастоянов Д., Ячев И., Хинов К., Балабозов Й., Брайлов дисплей, заявка за патент на РБ, рег. № 111638 от 29.11.2013.
3. D. Karastoyanov, I. Yatchev, K. Hinov, I. Balabozov., Braille display, WIPO / PCT / BG 2014 / 000038, Oct. 24-th, 2014. (заявка за европейски патент)

УЧАСТИЕ В НАУЧНИ ПРОЕКТИ СВЪРЗАНИ С ДИСЕРТАЦИЯТА

1. 6466-1/2011. Изследване и разработка на модули за Брайлов екран. Ръководител проф. И. Ячев. Договор по НИС с възложител БАН.
2. 6466-1/2012. Оптимизация на параметрите на Брайлов екран. Ръководител проф. И. Ячев. Договор по НИС с възложител БАН.
3. 122ПД0076-01/2012. Моделиране и оптимизация на електромагнити за Брайлов дисплей. Ръководител проф. И. Ячев. Проект за подпомагане на докторанти по вътрешния конкурс за научни изследвания на ТУ-София.

MODELING AND OPTIMIZATION OF ELECTROMAGNETS WITH PERMANENT MAGNETS FOR BRAILLE SCREEN

Author: M. Sc. Eng. Iosko Slaveev Balabozov

The constant progress of technology and the increasing linking of the human in the modern world with computer systems and many other high-tech devices, make it difficult the integration of people with disabilities. For the blind people currently are available specialized screens, terminals, printers, scanners and other devices, by which they have easy access to the information. The future progress of the technologies and finding the new ones will make availability of tactile displays, by which blind people can obtain graphical information.

The objective of the PhD work is developing and optimization of electromagnetic actuators with build in permanent magnet. This actuators will be used in Braille screen. In order to achieve objective of the work, the following main tasks have been accomplished:

- Study and modeling of the existing structures of electromagnets for Braille displays;
- New constructions of the electromagnetic modules with built in permanent magnet was developed;
- The software optimization was carried out for the new construction;
- The prototypes of the new construction were built;
- The experiments with the prototypes were carried out.

In the PhD thesis computer modeling and experimental study are used. The modeling is made by using of finite element method for analysis of axisymmetric and 3D-dimensional magnetic fields and also numerical methods for solving systems of ordinary differential equations and optimization methods. The existing laboratory units and digital instrumentation are used for experimental achieving of the static and dynamic characteristics of the studied permanent magnet actuator. The accurate impulse power feeding of the actuator is carried out by additionally designed new electronic scheme of “one shot” multivibrator. The electronic board for accelerometer was also built. For improving of the experimental results, an additional experiment with high speed camera was carried out.