



ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ – СОФИЯ
ЕЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИ ФАКУЛТЕТ
КАТЕДРА „ЕЛЕКТРИЧЕСКИ АПАРАТИ”

маг. инж. Мехмет Шен

**ИЗСЛЕДВАНЕ НА ТОКОВ СЕНЗОР ОСНОВАН НА
ЕФЕКТ НА ХОЛ**

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: „Електрически апарати”

НАУЧЕН РЪКОВОДИТЕЛ:
проф. д.т.н. инж. Иван Ячев

СОФИЯ
2021

Дисертационният труд е обсъден и насочен за защита на разширено заседание на Катедрен съвет на катедра „Електрически апарати” при Технически университет – София, състояло се на 19.07.2021 г.

Защитата на дисертационния труд ще се състои на 08.11.2021г. от 13:00ч. в конферентната зала на БИЦ на ТУ-София на открито заседание на научното жури, определено със заповед № ОЖ-5.2-79 от 22.07.2021 г. на Ректора на ТУ-София в състав:

1. проф. д-тн инж. Иван Ячев - председател
2. доц. д-р инж. Валентин Матеев – научен секретар
3. проф. д-р инж. Иван Миленов
4. проф. д-р инж. Георги Павлов
5. проф. д-р инж. Васил Димитров

Рецензенти:

1. проф. д-р инж. Иван Миленов
2. доц. д-р инж. Валентин Матеев

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

Дисертантът е докторант към катедра „Електрически апарати” при Електротехнически факултет на Технически университет – София. Изследванията по дисертационната разработка са направени от автора.

Автор: маг. инж. Мехмет Шен

Заглавие: Изследване на токов сензор основан на ефект на Хол

Тираж: 30 бр.

Отпечатано в ИПК на Технически университет – София

ОБЩА ХАРАКТЕРИСТИКА НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

Актуалност на темата

Електронните устройства, които нарастват по брой и разнообразие с развитието на технологията, променят магнитното поле, в което се намират. Променящото се магнитно поле не позволява на проектираните вериги да работят без да засягат други устройства. Това нарушава линейността на сензорите, които откриват и измерват промяната на магнитното поле. Сензорите на Хол са най-предпочитаните сензори сред приложенията на полеви сензори. Чрез по-голяма линеаризация на интегрираните сензори на Хол се осигурява ефективност при приложения, които изискват голям брой измервания.

Сензорите с ефект на Хол, които се използват много широко в автомобилните технологии, извършват измервания в съществуващите си структури чрез позициониране на бобината и постоянния материал в нея. Но по-качествените, стабилни и дълготрайни структури на интегрираните сензори за ефект на Хол показваха, че през следващите години ще се използват повече интегрирани сензори за ефект Хол. Подобна ситуация се среща и в други индустриални приложения. По света се произвеждат средно 5 милиона превозни средства годишно, а сензорите с ефект на залата се използват средно между 17 и 20. По време на нашите изследвания са проведени различни проучвания с компании от автомобилната индустрия в Бурса и се опитахме да намерим области за поддръжка и приложение за сензори с ефект на Хол, ток и положение, които ще бъдат разработени.

Цел на дисертационния труд

Основната цел на това проучване е изследване на токов сензор основан на ефект на Хол, оценка на влиянието на магнитен концентратор върху характеристиките на сензора и реализиране на хардуер и софтуер за експериментално изследване на сензорите.

Задачи за постигане на целта:

1. Компютърно моделиране на токов сензор основан на ефекта на Хол и изследване на влиянието на различни геометрични фактори върху неговите характеристики.
2. Изследване на влиянието на магнитен концентратор и неговите параметри върху характеристиките на токов сензор основан на Хол ефект и оптимизиране на сензор с магнитен концентратор.
3. Реализиране на хардуер и софтуер за експериментални изследвания на токови сензори основани на ефекта на Хол.

Научна новост

Разработен е компютърен модел, използващ метода на крайните елементи, е за анализ на магнитно и електрическо поле в токов сензор, базиран на ефект на Хол, и е оценено влиянието на различни геометрични параметри на пластината на Хол върху характеристиките на сензора. Разработени са триизмерни параметризирани модели чрез метода на крайните елементи за анализ на магнитното поле на токов сензор, базиран на ефекта на Хол, с правоъгълни и тороидални магнитни концентратори с отворен и затворен магнитопровод. Използвайки разработените модели е оценено влиянието на различни

геометрични параметри върху зависимостта на изходния сигнал от разстоянието до проводника и са идентифицирани значимите параметри. Извършена е оптимизация на токов сензор с тороидален магнитен концентратор с отворен магнитопровод, с цел постигане на максимално близка до линейна зависимост между изходния сигнал и положението на проводника, като целевата е избрана да бъде да бъде коефициентът на определяне за модела на линейна регресия на зависимостта изходен сигнал - позиция на проводника. Установено е, че използването на мултисензорен подход с няколко сензора на Хол с различна чувствителност намалява нелинейните грешки в системата. С използването на няколко сензора на Хол обхватът на измерване е разширен и е осигурена възможност за по-прецизни измервания в по-широк диапазон на входната величина.

Практическа приложимост

Практическата приложимост на получените резултати е в две насоки – намаляване на зависимостта на изходния сигнал от разстоянието до проводника и разширяване на обхвата на измервания ток при запазване на точността на измерването.

Апробация

Основните резултати от дисертационния труд са докладвани на национални и международни конференции и са публикувани в периодични издания:

- международен симпозиум International Symposium on Theoretical Electrical Engineering ISTET 2017, Илменау, Германия;
- международен симпозиум 18th International Symposium on Electromagnetic Fields in Mechatronics, Electrical and Electronic Engineering ISEF 2017, Лодз, Полша;
- международна конференция 15th International Conference on Electrical Machines, Drives and Power Systems, ELMA 2017, София, България;
- IX-та научна конференция ЕФ 2017 - Варна, България;
- международна научна конференция 26th International Scientific Conference Electronics, ET 2017 - Созопол, България;

Публикации

По дисертационния труд са направени 5 публикации, от които две в списания в чужбина с импакт фактор, една в списание в България и две в трудове на конференции, индексирани в Scopus и Web of Science. Забелязани са 25 цитирания в Scopus на публикациите по дисертацията.

Структура и обем на дисертационния труд

Дисертационният труд съдържа 130 страници. Състои се от увод, 90 фигури и 6 таблици в четири глави, заключение с приноси в дисертацията, публикации по дисертацията и литература. Списъкът на използваните литературни източници е съставен от 122 заглавия.

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

СЪДЪРЖАНИЕ НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

ГЛАВА ПЪРВА СЪСТОЯНИЕ НА ПРОБЛЕМА

В главата е направено литературно проучване, формулирани са целта и задачите на дисертацията и са набелязани методите за изследване.

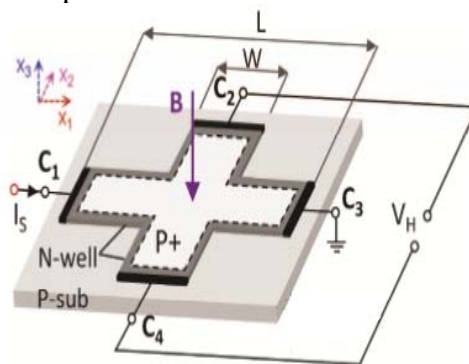
Анализът на прегледаните информационни източници води до следните изводи:

1. Токовите сензори, базирани на ефекта на Хол, се използват широко в различни приложения. Към тази тема непрекъснато има интерес както от изследователите, така и от компаниите.
2. Проблемът със зависимостта от разстоянието до измервания ток и влиянието му върху грешката при измерване не е напълно решен.
3. За постигане на линейност на сензорите се използват както хардуерни, така и софтуерни подходи.
4. Трябва да се търсят решения за минимизиране на влиянието на електромагнитните смущения.

ГЛАВА ВТОРА МОДЕЛИРАНЕ НА ТОКОВ СЕНЗОР ОСНОВАН НА ЕФЕКТ НА ХОЛ

2.1. Моделиране чрез метода на крайните елементи (МКЕ)

В настоящата глава се извършва моделиране на токов сензор въз основа на ефекта на Хол по метода на крайните елементи. Основна структура на CMOS пластината на Хол е дадена на фиг. 2.1.



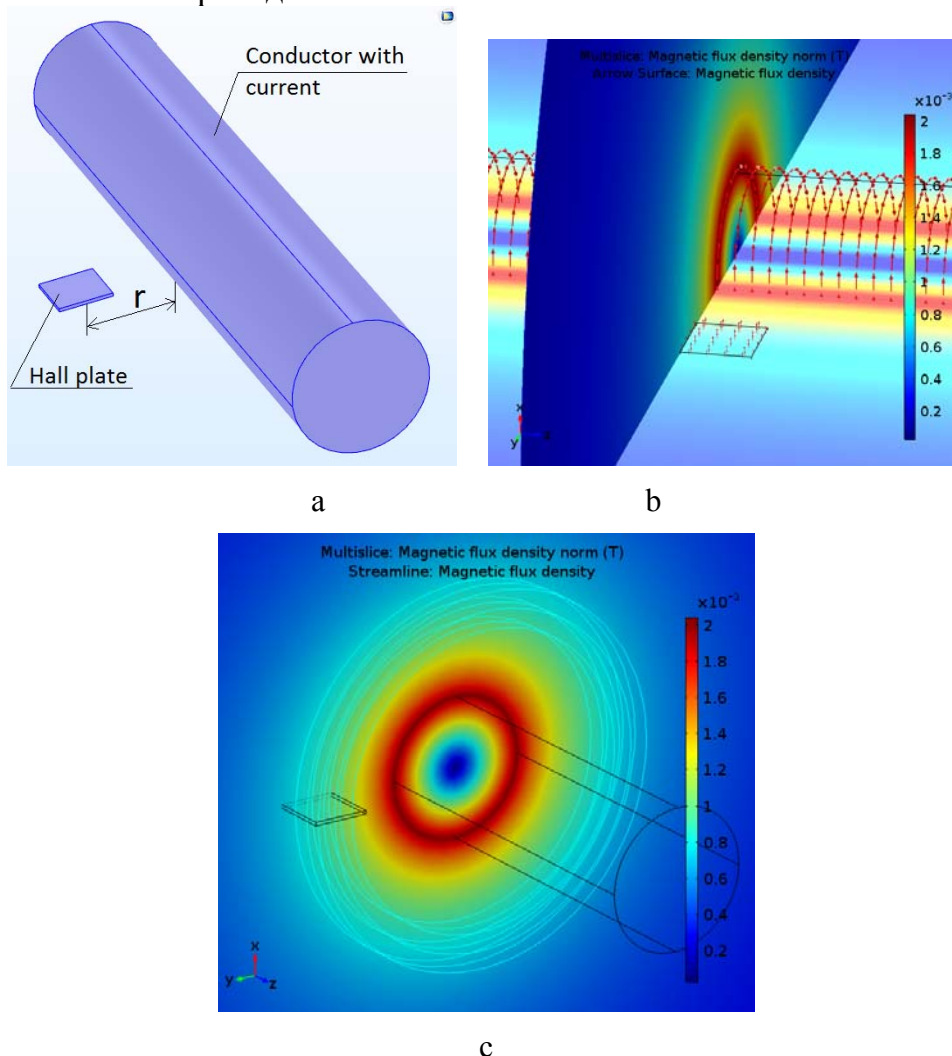
Фигура 2.1. Кръстовиден хоризонтален CMOS сензор за ефект на Хол [110]

Софтуерът по МКЕ COMSOL Multiphysics [121] се използва за моделиране на изследван сензор. Вграденият интерфейс „Електрически токове“ се използва за моделиране на пластината на Хол. Магнитното поле се изчислява в отделен модел и резултатите за магнитната индукция се задават аналитично в модела на сензора. Магнитната индукция, преминаваща през сензора на Хол, поставен на определено разстояние r от центъра на прав проводник с проводник с кръгло напречно сечение с ток I , също може да се изчисли чрез израза:

$$B(I, r) = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot \frac{I}{2\pi \cdot r} \quad (2.1)$$

На фиг. 2.2 са показани 3D геометрия и визуализация на магнитно поле в близост до зоната на пластината на Хол. За да се види, пластината на Хол, на

фигурата тя е увеличена 100 пъти, тъй като реалните размери са много малки в сравнение с тези на проводника.

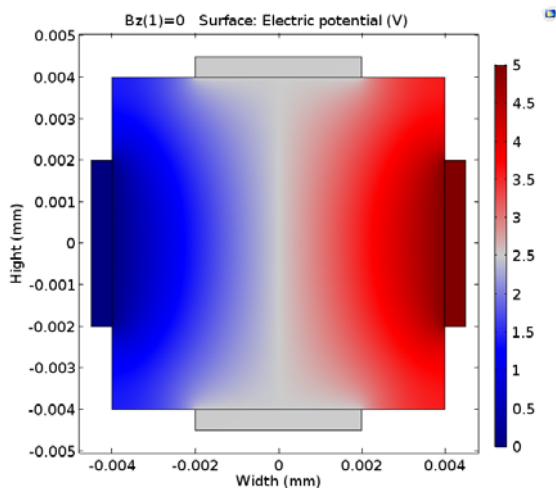


Фигура 2.2. 3D геометрия (a) и магнитно поле (b, c) от COMSOL модел

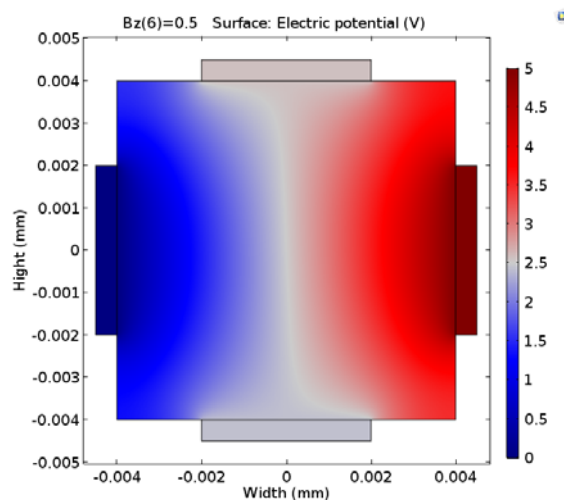
За пластината на Хол се използва силициев материал от библиотеката COMSOL. Неговите физически параметри са дадени в таблица 2.1. Дебелината на пластината на Хол е $0,5 \mu\text{m}$.

2.2. Разпределение на електрическото поле в пластината на Хол

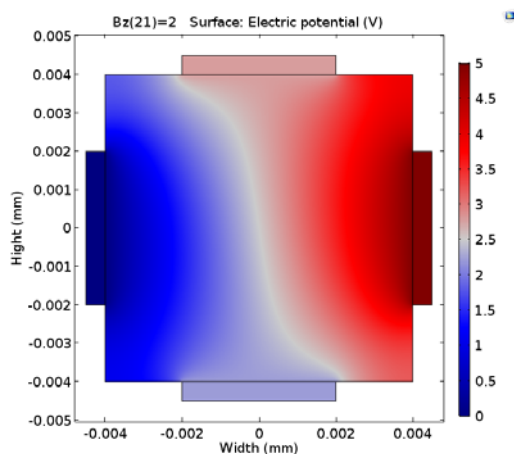
Визуализацията на електрическото поле в сензора на Хол, използван за измерване на ток, когато магнитното поле не преминава, са показани на фиг. 2.3. Същите резултати, но когато магнитно поле е приложено към сензора, са дадени на фиг. 2.4 и фиг. 2.5. Характеристиката на предавателната функция, изчислена от МКЕ модела на токовия сензор, е показана на фиг. 2.6.



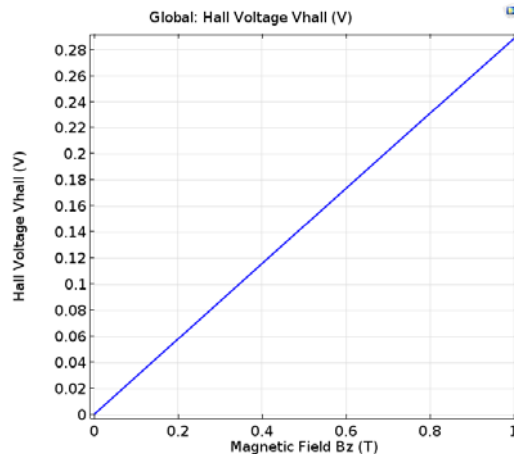
Фигура 2.3 Електрическо поле в пластината на Хол при липса на магнитно поле



Фигура 2.4 Електрическо поле в плочата на Хол, когато индукцията е $B_z = 0,5T$



Фигура 2.5 Електрическо поле в пластината на Хол, когато индукцията е $B_z = 2, T$



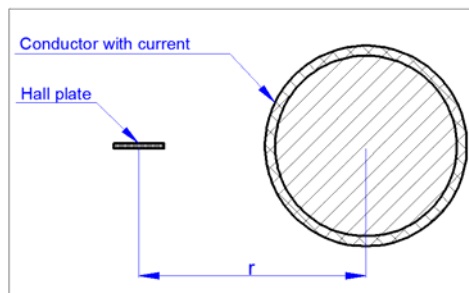
Фигура 2.6 Предавателна функция на пластината на Хол, използвана в токовия сензор

Въпреки че изходът на сензора е линеен по отношение на входното магнитно поле, зависимостта на изходния сигнал (напрежение на Хол) от разстоянието до проводника е хиперболична функция, както може да се види от (1), а също и на фиг. 2.8.

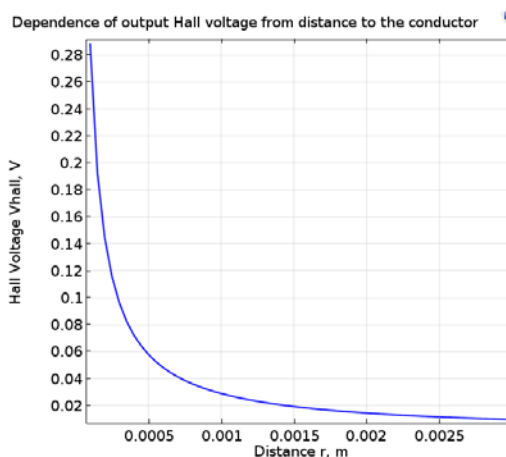
2.3. Влияние на геометричните параметри

2.3.1 Разстояние от сензора до проводника

На фиг. 2.7 е показана основната 2D геометрия и разстоянието между сензора и проводника. Влиянието на разстоянието се изучава в модела на МКЕ. Получена е зависимостта на изходния сигнал на изследвания токов сензор въз основа на ефекта на Хол от разстоянието до проводника. На фиг. 2.7 е показана основната 2D геометрия и разстоянието между сензора и проводника. Влиянието на разстоянието се изучава в модела на МКЕ. Получена е зависимостта на изходния сигнал на изследвания токов сензор въз основа на ефекта на Хол от разстоянието до проводника.



Фигура 2.7 Определение на разстоянието r до проводника

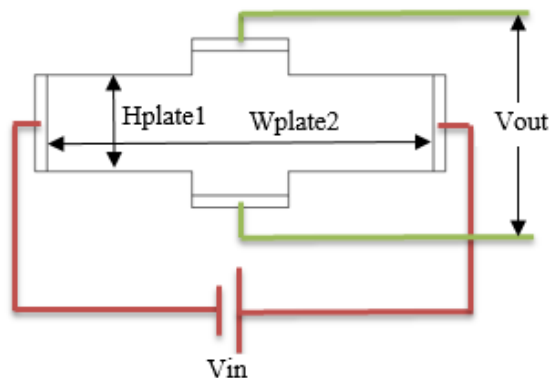


Фигура 2.8 Зависимост на изходния сигнал от разстоянието до проводника

Получената характеристика на фиг. 2.8 показва силно намалената чувствителност на сензора дори на малко разстояние до проводника.

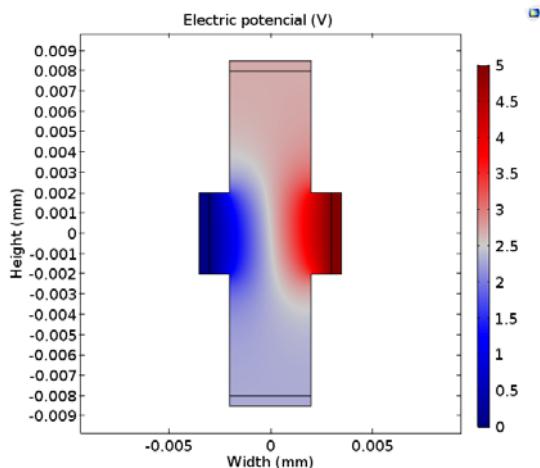
2.3.2 Асиметрична геометрия на пластината на Хол

На фиг. 2.9 е показана основната асиметрична геометрия. В МКЕ моделите се използва параметрична опция, за да се получи изходно напрежение при различна височина (H_{plate1}) и ширина (W_{plate2}) на пластината.

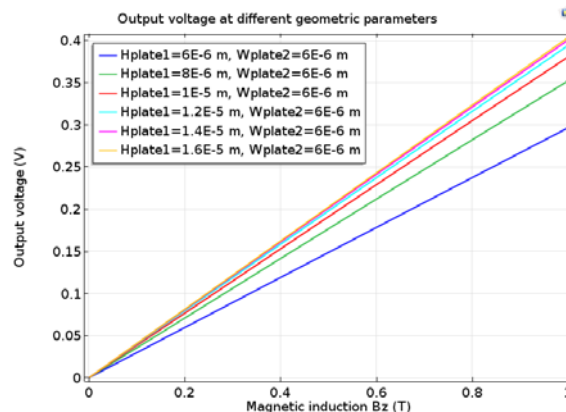


Фигура 2.9. Основна геометрия и параметри, използвани за изучаване на асиметрична пластина.

Фиг. 2.10 показва електрическото поле в пластината на Хол, когато разстоянието между страните на изходния сигнал е по-голямо от разстоянието между захранващите страни.



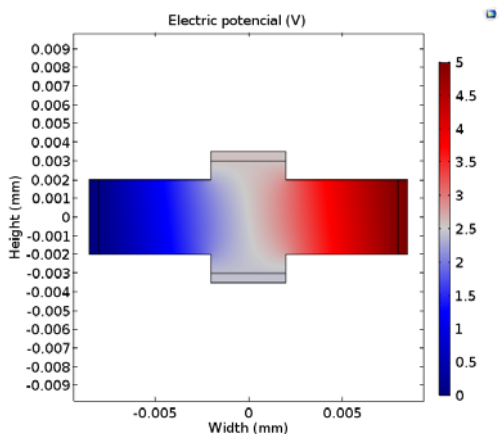
Фигура 2.10. Електрическо поле в плочата на Хол, когато $H_{plate1} > W_{plate2}$



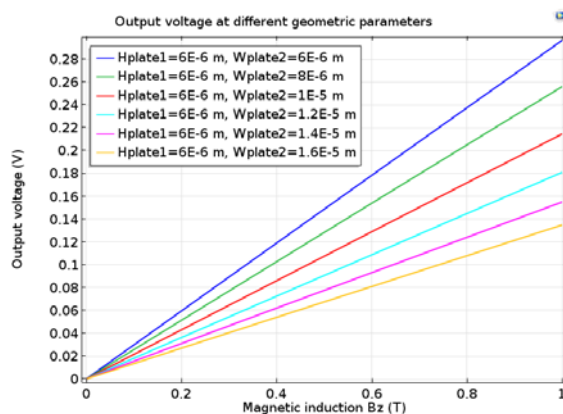
Фигура 2.11. Резултати за изходното напрежение, когато $H_{plate1} > W_{plate2}$

W_{plate2} , са показани на фиг. 2.11. Ясно е, че чувствителността на сензора се влияе от височината H_{plate1} , която е до два пъти по-голяма от ширината W_{plate2} .

Електрическото поле за обратния случай, т.е. когато разстоянието между страните на изходния сигнал е по-малко от разстоянието между захранващите страни, е показано на фиг. 2.12. Резултатите за различни стойности на ширината и височината на пластината са дадени на фиг. 2.13



Фигура 2.10. Електрическо поле в плочата на Хол, когато $H_{plate1} < W_{plate2}$



Фигура 2.11. Резултати за изходното напрежение, когато $H_{plate1} < W_{plate2}$

2.4. Основни изводи от глава 2

В тази глава са разработени компютърни модели на магнитното и електрическото поле в сензор за ток, базиран на ефекта на Хол.

Чрез създадени и тествани модели на токови сензори, базирани на ефекта на Хол, бяха установени някои основни параметри. Получават се резултати за разпределение на магнитното и електрическото поле. Получена е зависимост на изходния сигнал от разстоянието до проводника, както и разпределението на електрическото поле за различни съотношения на ширината и височината на пластината на Хол.

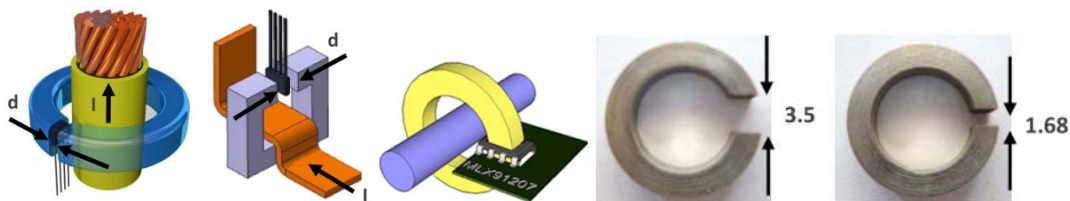
Едно от приложенията, при които тези модели ще бъдат полезни, е в търсенето на подобрен дизайн на такива сензори, особено когато се използват допълнителни концентратори на магнитно поле за намаляване на зависимостта

от разстоянието между проводника и сензора, както и при въвеждане на нови материали в структурата на сензора.

ГЛАВА ТРЕТА

ВЛИЯНИЕ НА МАГНИТЕН КОНЦЕНТРАТОР

Както се вижда от предишната глава, изходният сигнал на пластината на Хол зависи нелинейно от разстоянието до проводника. Производителите са въвели магнитни концентратори, както е показано на фигура 3.1 .



Фигура 3.1. Обикновени конструкции на магнитни концентратори [Melexis]

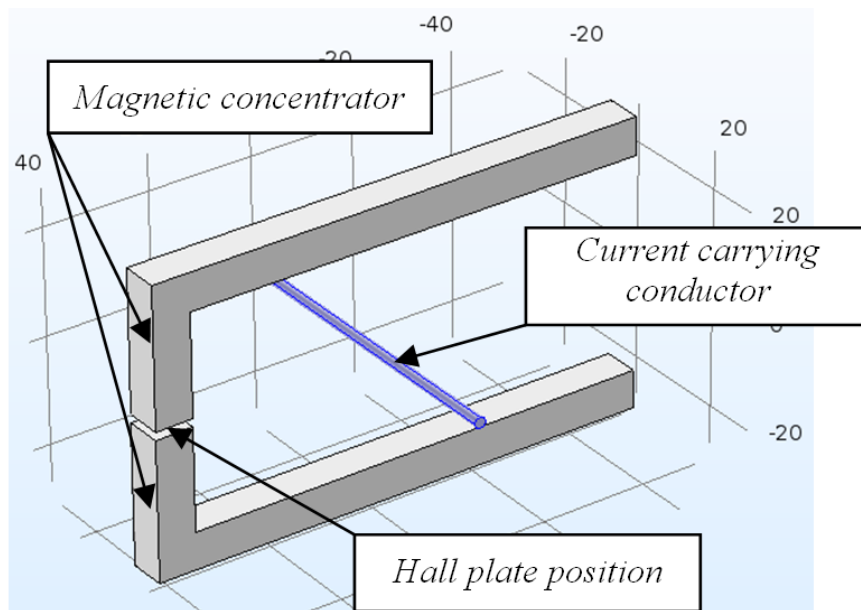
За случая без галванична връзка обаче проблемът все още трябва да бъде решен. Ето защо се разглеждат различни конструкции на магнитни концентратори - магнитно ядро около пластината на Хол - с цел намаляване на тази нелинейност и получаване на изходен сигнал с близо до линейна зависимост от разстоянието до проводника.

3.1. Правоъгълен концентратор с отворен магнитопровод

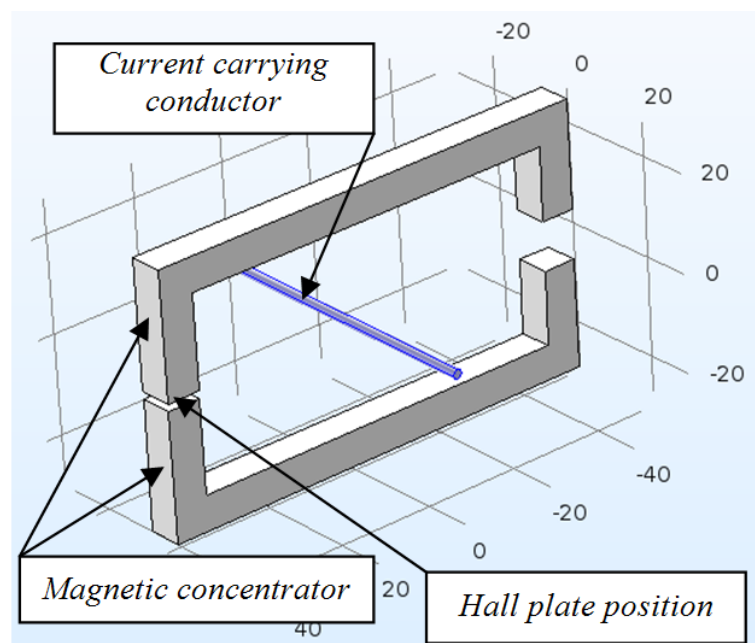
Разглеждат се две конструкции на отворената правоъгълен магнитопровод на токовия сензор - правоъгълен С-образен магнитопровод с една въздушна междина за датчика на Хол (наричана конструкция с една въздушна междина или концентратор с една въздушна междина) и правоъгълен магнитопровод с две въздушни междини - една за сензора на Хол и една допълнителна въздушна междина, поставена на противоположното ядро (наричана конструкция с две въздушни междини или концентратор с две въздушни междини).

Конструкцията с една въздушна междина се състои от два феромагнитни ярема, които от единия край са свързани с ядро с въздушна междина, където е поставена пластината на Хол - Фигура 3.2. Размерите, дадени на фигурата, са в милиметри. Пластината на Хол също е включена в модела - във въздушната междина - и нейните размери се считат за $0,24 \times 0,24 \times 0,1$ mm.

Конструкцията с две въздушни междини (Фигура 3.3) е подобна на тази на Фигура 3.2, но е въведено второ ядро с втора междина. Втората междина е по-голяма от тази, в която се намира пластината на Хол, и е достатъчно голяма, за да позволи преминаване на проводник през нея.



Фиг. 3.2. Конструкция с една въздушна междина.

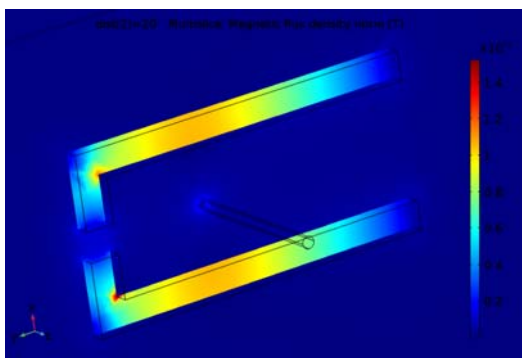


Фиг. 3.3. Конструкция с две въздушни междини.

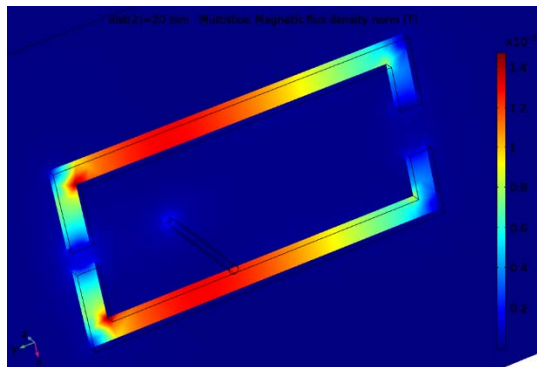
3.1.1. Моделиране чрез МКЕ

Методът с крайни елементи се използва за моделиране на магнитното поле на двете конструкции. За тази цел е използвана програмата Comsol Multiphysics. Използвани са AC / DC модул и интерфейс Magnetic Fields. Анализът на крайните елементи се извършва за 10 A стойност на тока в проводника и различни параметри на магнитния концентратор. Резултатите за разпределението на магнитната индукция за един вариант на двете разглеждани конструкции са показани на Фигура 3.4 и Фигура 3.5. Въпреки че вътрешните размери на концентратора с две пролуки са по-големи, отколкото при този с една междина, индукцията е по-голяма поради въвеждането на ядро с втора междина. За да се оцени ефектът от въвеждането на магнитен концентратор, зависимостта на индукцията в пластината на Хол (обща интегрална средна стойност) от разстоянието до проводника за конструкция без магнитен концентратор е

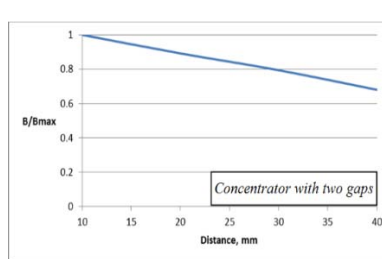
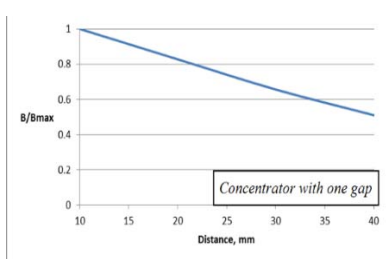
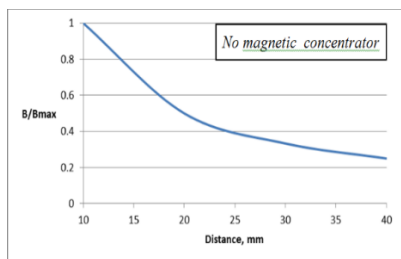
показана на фигура 3.6а. На фигура 3.5b и фигура 3.6с, същата зависимост е показана за конструкциите с концентратори с една и две междини. И двете връзки са близки до линейните, докато за варианта без концентратор зависимостта е силно нелинейна, както вече беше показано в Глава 2.



Фигура 3.4 Разпределение на индукцията за конструкцията с една въздушна междина



Фигура 3.5 Разпределение на индукцията за конструкцията с две въздушни междини



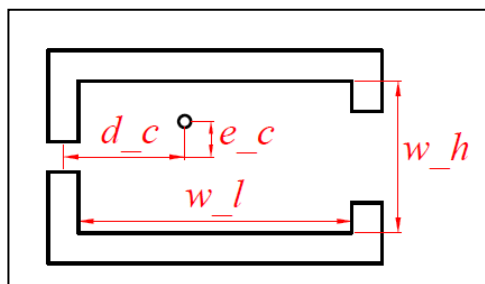
Фигура 3.6. Зависимост на индукцията от разстоянието до проводника (a, b, c).

3.1.2. Влияние на геометричните параметри

И за двете конструкции е изследвано влиянието на различни геометрични параметри. Различните параметри за случая с една въздушна междина са показани на фигура 3.7. В допълнение към разстоянието между пластината на Хол и проводника (обозначено с d_c), параметрите, подлежащи на промяна, са дължината на прозореца (w_l), височината на прозореца (w_h) и ексцентриситетът e_c на проводника по отношение на централната линия. В случая на концентратор с две пролуки, размерът на допълнителната въздушна междина също варира.

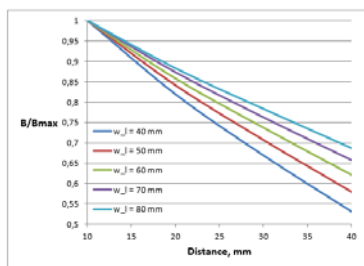
Останалите геометрични параметри са фиксирани, както следва:

- напречното сечение на магнитопровода е с размер 7x7 mm;
- Въздушна междина, побираеща пластината на Хол - 1,5 мм;
- Диаметърът на проводника е 2 мм.

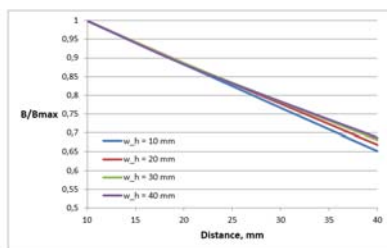


Фигура 3.7. Параметри, подлежащи на промяна за конструкцията с една въздушна междина

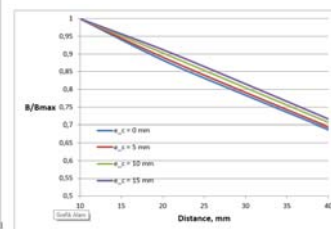
Три параметъра са променени за конструкцията с една въздушна междина - дължината w_l и височината w_h на прозореца и отклонението на проводника от централната линия на симетрия e_c . Зависимостта на относителната индукция от разстоянието между проводника и пластината на Хол за различни стойности на параметрите на конструкцията с една въздушна междина е показана на фигура 3.8, фигура 3.9 и фигура 3.10.



Фигура 3.8 Зависимост на индукцията от разстоянието до проводника за концентратор с една междина и различна дължина на прозореца w_l .



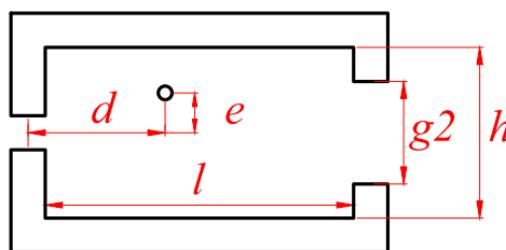
Фигура 3.9 Зависимост на индукцията от разстоянието до проводника за концентратор с една междина и различни височини на прозореца w_h .



Фигура 3.10 Зависимостта на индукцията от разстоянието до проводника за концентратор с една междина и различни стойности на e_c .

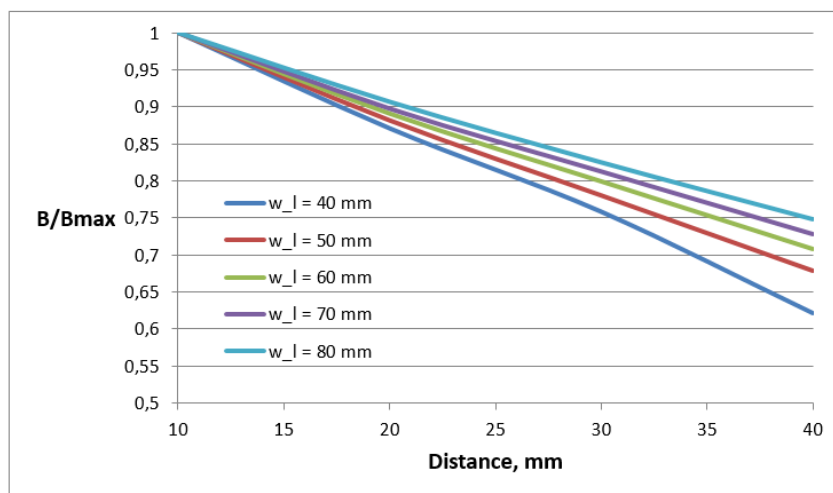
Вариациите на височината на а на магнитопровода и отклонението на проводника от централната линия на симетрия не водят до значителна промяна в характеристиките, докато дължината на прозореца влияе значително на характеристиката, което води до 15% вариация на сигнала.

Четири параметъра са варирани за конструкцията с две въздушни междини - Фигура 3.11. В допълнение към параметрите, вариращи за случая на една въздушна междина, варира и стойността на допълнителната въздушна междина $gap2$.

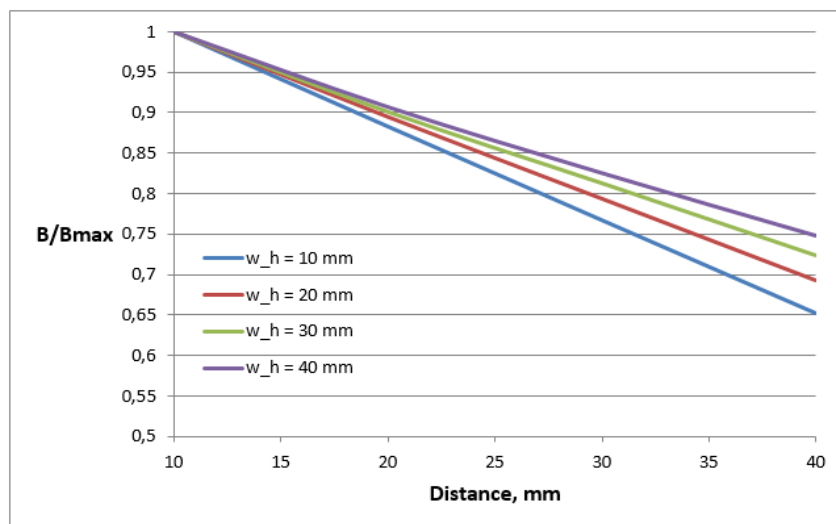


Фигура 3.11 Параметри, подлежащи на промяна в конструкцията с две въздушни междини

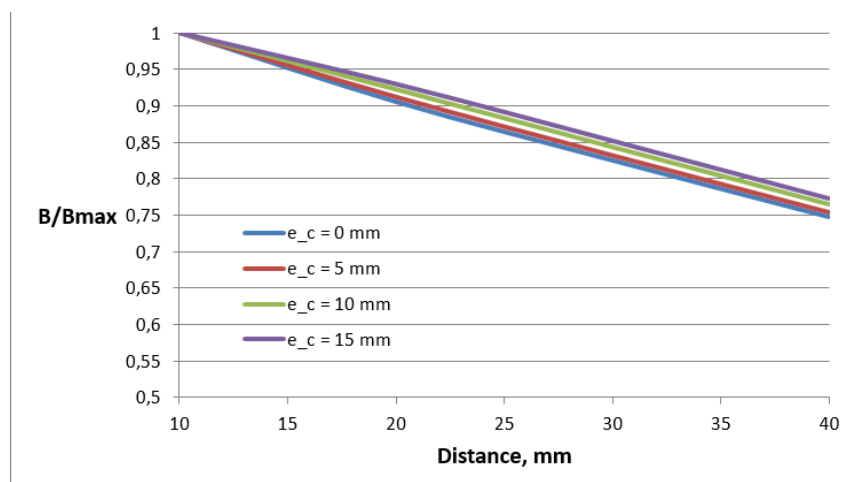
Зависимостите на относителната индукция от разстоянието между проводника и пластината на Хол за различни параметри на тази конструкция са показани на фигура 3.12, фигура 3.13, фигура 3.14 и фигура 3.15. За тази конструкция и двата размера на основния прозорец (дължина и височина) оказват влияние върху работата на сензора. По отношение на влиянието на втората въздушна междина, както може да се очаква, най-ниската зависимост от разстоянието се характеризира с конструкцията с най-малката стойност на втората въздушна междина. За сравнение, на фигура 3.15 е дадена и зависимостта на конструкцията със затворено ядро.



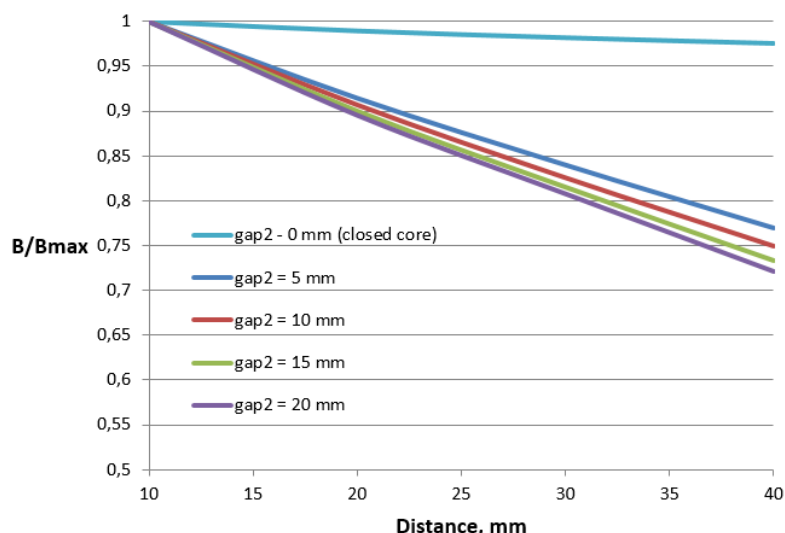
Фигура 3.12 Зависимост на индукцията от разстоянието до проводника за концентратора с две междини и различни дължини на прозореца w_l .



Фигура 3.13 Зависимост на индукцията от разстоянието до проводника за концентратора с две междини и различни височини на прозореца w_h .

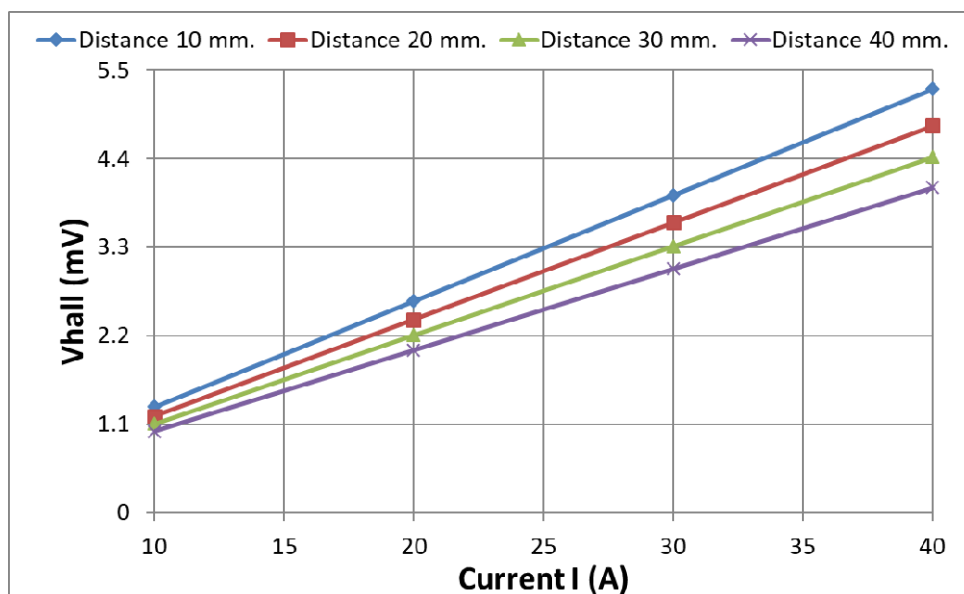


Фигура 3.14 Зависимост на индукцията от разстоянието до проводника за концентратора с две междини и различни деформации на проводника в напречна посока e_c



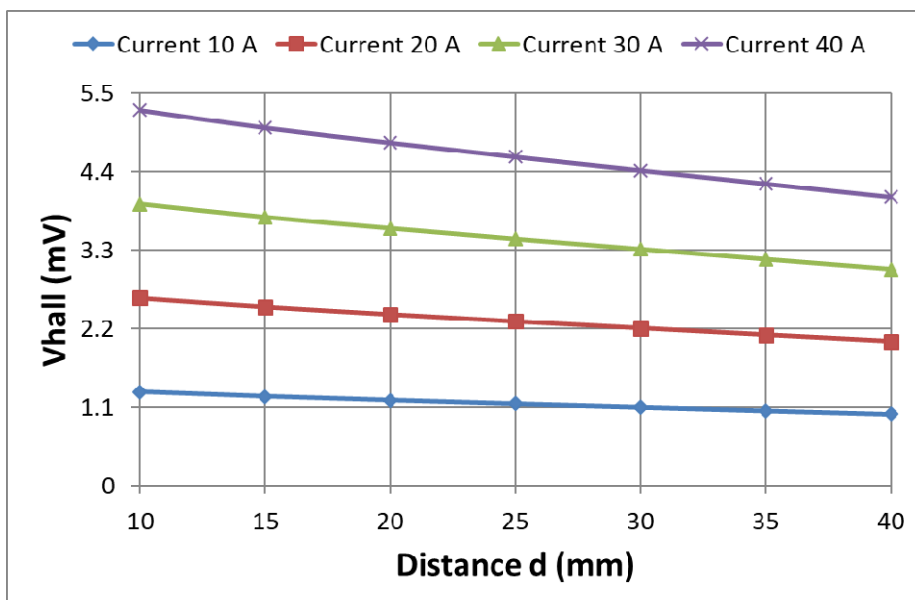
Фигура 3.15 Зависимост на индукцията от разстоянието до проводника за концентратора с две междини и различни стойности на втората въздушна междина

За тази конструкция дължината и височината на прозореца влияят повече на зависимостта от положението на проводника, което води до промени съответно от 13% и 10%. Вариацията на другите два изследвани параметъра води до по-малко от 5% промяна в характеристиката. За оценка на влиянието на стойността на тока върху сигнала на изходното напрежение от пластината на Хол, изходният сигнал е изчислен за различни стойности на тока, вариращи последните от 10 до 40 А. Изчисленията са извършени с помощта на подходът в глава 2 за конструкцията с две въздушни междини и стойност на втората междина 5 mm. На фигура 3.16 е дадена зависимостта на изходното напрежение V_{hall} на пластината на Хол от тока I за различно разстояние до проводника.



Фигура 3.16 Зависимост на напрежението на Хол на пластината V_{hall} от тока за различни разстояния до проводника.

На фигура 3.17, същото семейство криви е представено като зависимост на изходното напрежение на пластината на Хол от разстоянието до проводника за различни токове.

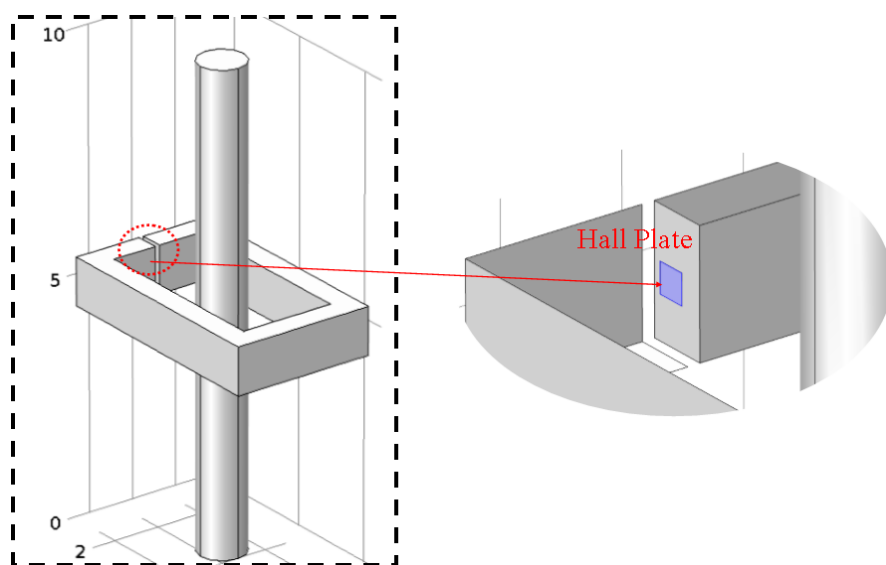


Фигура 3.17 Зависимост на напрежението на плаката на Хол V_{hall} от разстоянието до проводника за четири различни тока.

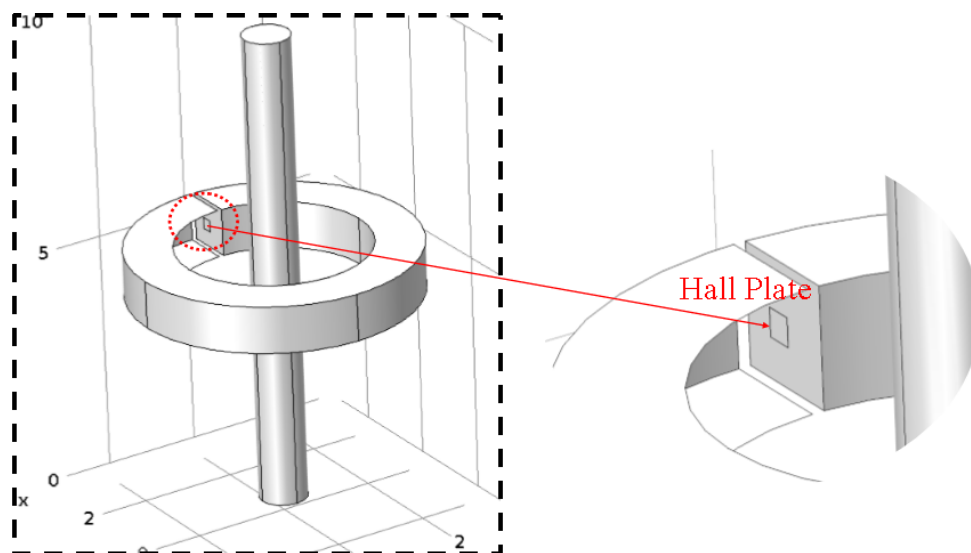
Получените резултати дават възможност за оценка на максималната разлика в изходния сигнал при промяна на разстоянието от проводника до пластината на Хол от 10 до 40 mm. Тази максимална разлика е по-малка от 24% за всички токове. Линейността на получените зависимости може да се използва като целева функция при бъдеща оптимизация. С най-доброто линейно напасване на характеристиките (изходно напрежение на пластината на Хол - дистанционен проводник-пластина на Хол) ще бъде възможно да се проектира токов сензор с предварителна прогнозна грешка на тока по отношение на грешката на разстоянието

3.2. Магнитен концентратор със затворен магнитопровод.

Разглеждат се две различни геометрии на затворени магнитни концентратори - затворена правоъгълна и затворена тороидална, обозначени съответно с конструкция 1 и конструкция 2. Основните им геометрии са показани на фигура 3.18 и фигура 3.19.

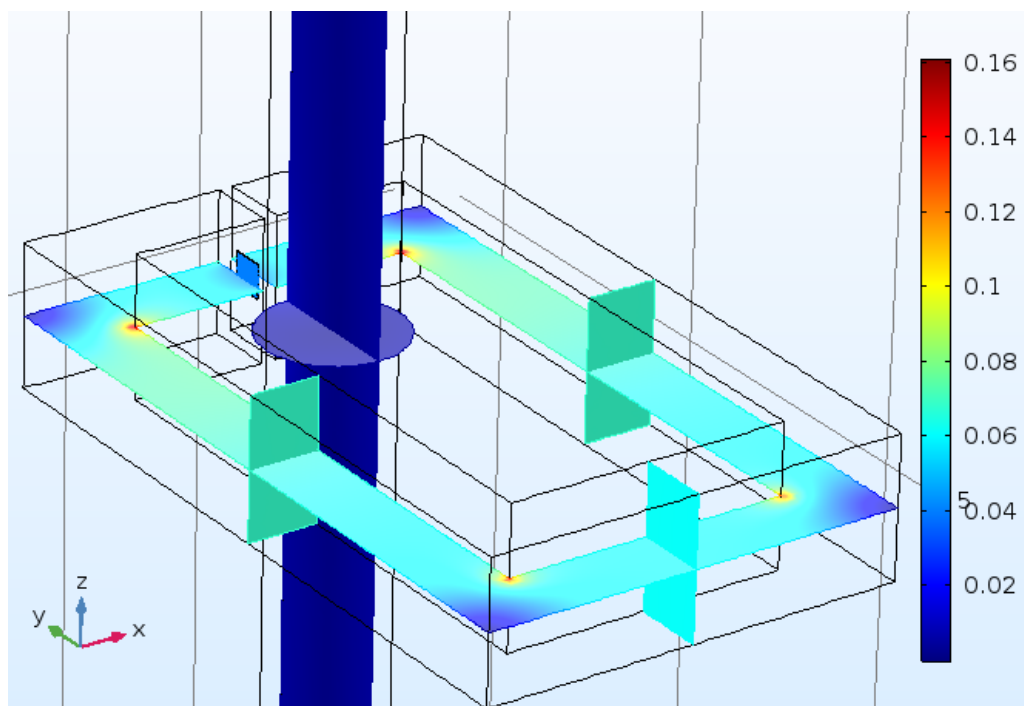


Фигура 3.18. Основна геометрия на конструкцията 1 - правоъгълен магнитен концентратор със затворено ядро



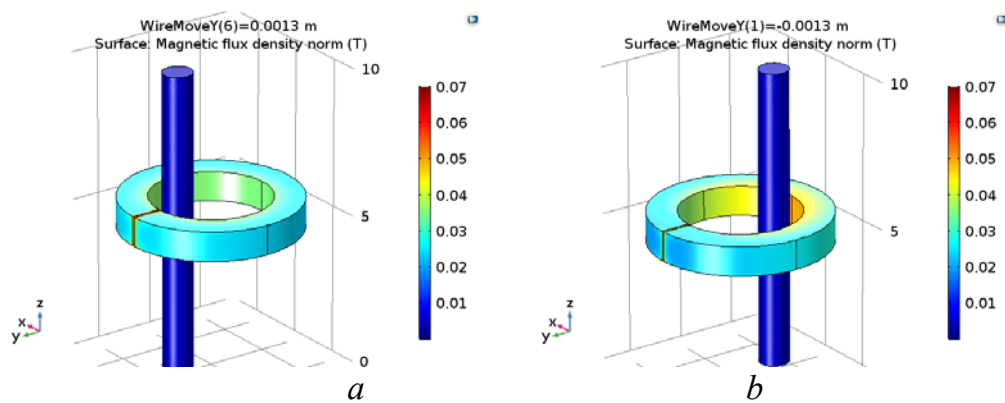
Фигура 3.19 Основна геометрия на конструкцията 2 - тороидален магнитен концентратор със затворено ядро

Илюстрация на разпределението на магнитната индукция за конструкцията с правоъгълен магнитопровод е показана на фигура 3.20. Разглеждат се различни позиции на токопроводящия проводник, като се настройва проводникът да се движи по линията на симетрия в посока y .



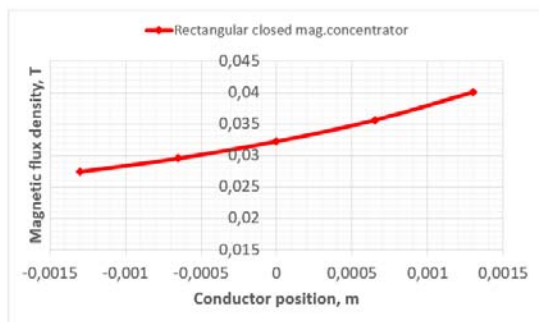
Фигура 3.20 Разпределение на магнитната индукция за конструкцията 1 - правоъгълен магнитен концентратор със затворено ядро.

Разпределението на индукцията за тороидален концентратор със затворен магнитопровод е показано на Фигура 3.21 а и б. За тази конструкция проводникът се премества отново в посока y , по линията на симетрия, която преминава през пластината на Хол. Двете позиции на проводника на фигура 3.21 а и б са позициите на тази линия на симетрия, които съответстват на най-близкото положение до пластината на Хол и най-отдалеченото положение на проводника. Извършват се и компютърни симулации за други позиции на проводника.

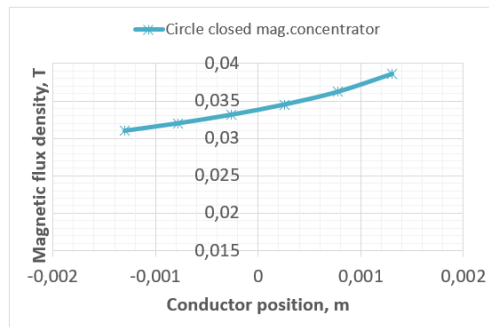


Фигура 3.21 Разпределение на магнитната индукция за конструкция 2 - тороидален магнитен концентратор със затворено ядро (a - най-отдалеченото положение; b - най-близкото положение).

Както се вижда, има значителна разлика между разпределението на индукцията за двете крайни позиции на проводника. Това показва, че дори концентраторът със затворен магнитопровод не гарантира независимост на позицията на проводника. Това е по-ясно показано на фигура 3.22 и фигура 3.23, където е показана магнитната индукция в пластината на Хол за конструкции 1 и 2, когато проводникът се движи в концентратора от най-отдалечената точка на пластината на Хол до най-близката .



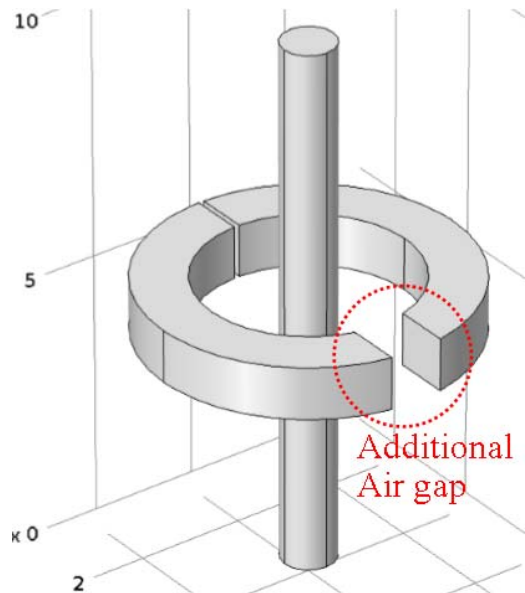
Фигура 3.22 Зависимост на плътността на магнитния поток в пластината на Хол от положението на проводника за конструкция 1.



Фигура 3.23 Зависимостта на магнитната индукция в пластината на Хол от положението на проводника за конструкция 2

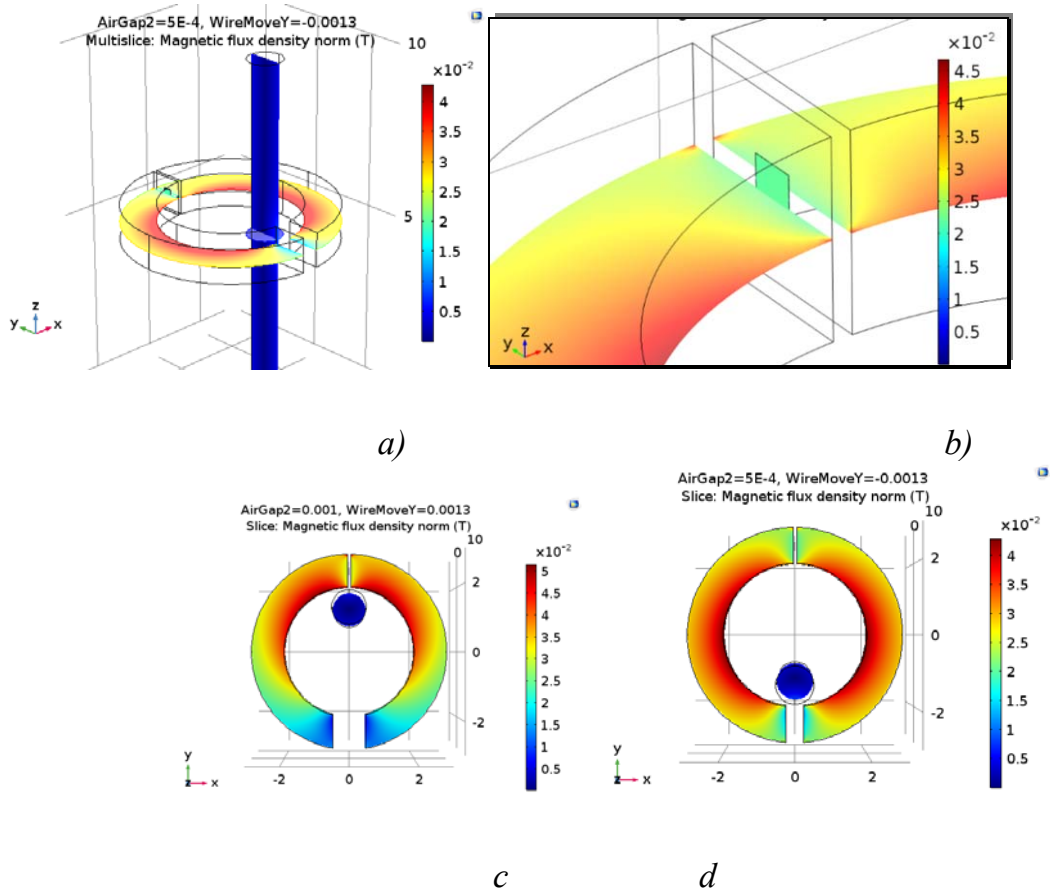
3.3. Тороидален концентратор с отворен магнитопровод

Разглежданата конструкция с магнитен концентратор с отворен магнитопровод се разглежда, както е показано на фиг. 5 - тороидално ядро с две въздушни междини - една за пластината на Хол и една допълнителна въздушна междина, разположена на противоположната страна на магнитопровода. Втората въздушна междина е по-голяма от тази за пластината на Хол.



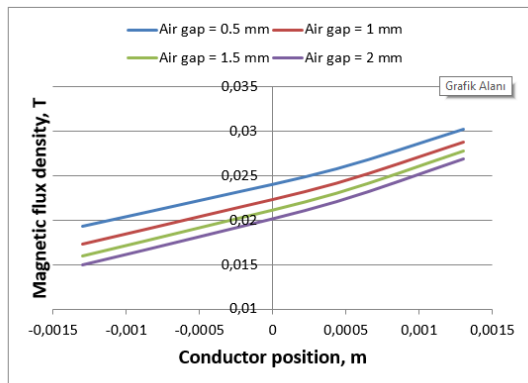
Фигура 3.24 Основна геометрия на конструкцията 3 - тороидален магнитен концентратор с отворен магнитопровод

На фигура 3.25a-d е дадено разпределение на магнитната индукция за различни стойности на допълнителната въздушна междина, различни позиции на проводника и различни изгледи. Местоположението на пластината на Хол може да се види на Фигура 3.25a, b.

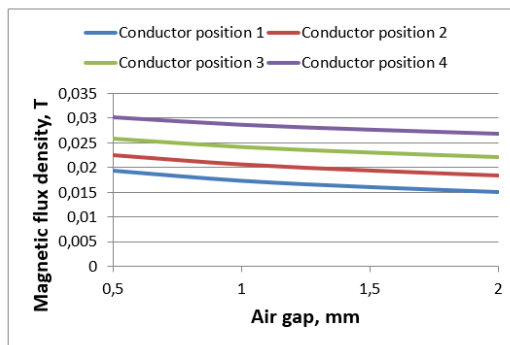


Фигура 3.25 Разпределение на магнитното поле за конструкция 3 - с тороидален магнитен концентратор с отворено ядро

На фигура 3.26 е дадена зависимостта на магнитната индукция в пластината на Хол от положението на проводника за 4 различни стойности на допълнителната въздушна междина. На фигура 3.27 е дадена зависимостта на магнитната индукция в пластината на Хол от размера на допълнителната въздушна междина, Положението на проводника 4 е най-близко до пластината на Хол.

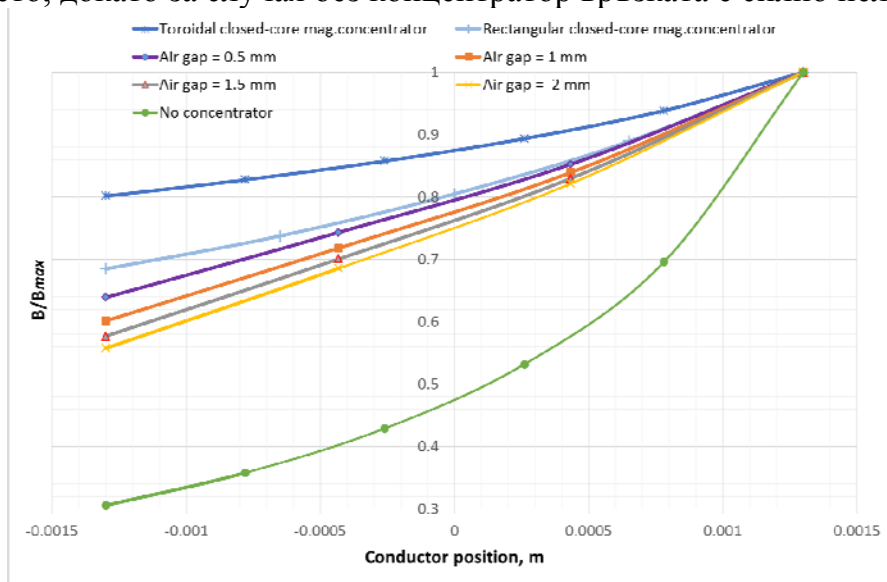


Фигура 3.26 Магнитна индукция в зависимост от площта на Хол в зависимост от положението на проводника за конструкция 3 при различни стойности на допълнителната въздушна междина



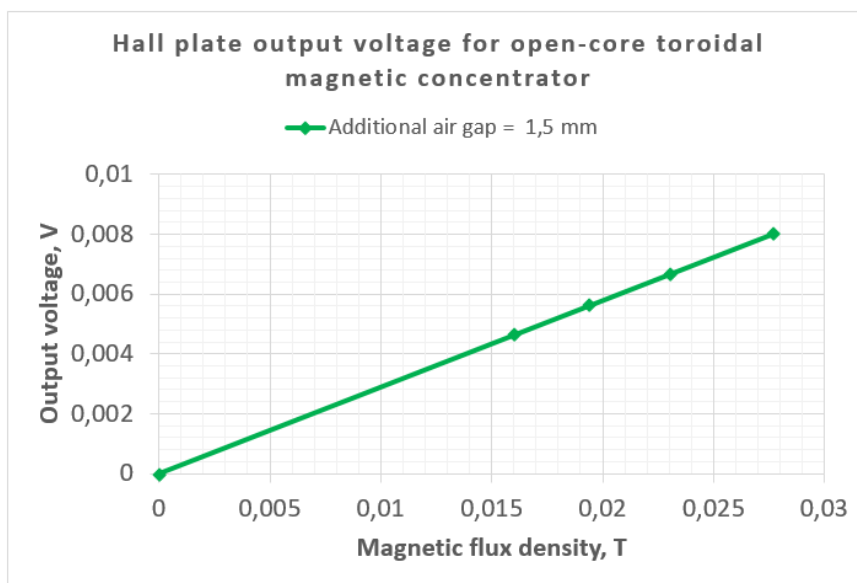
Фигура 3.27 Зависимост на магнитния поток в площта на Хол в зависимост от размера на допълнителна въздушна междина за конструкция 3, при четири неподвижни положения на проводника

На фигура 3.28 е дадена зависимостта на магнитната индукция в пластината на Хол от положението на проводника за трите изследвани конструкции. Индукцията се дава като съотношение към максималната му стойност, за да се даде възможност за сравнение. Включена е и допълнителна връзка за случая без магнитен концентратор. Всички взаимоотношения с магнитен концентратор на фигура 3.28 са по-близки до линейна зависимост от разстоянието, докато за случая без концентратор връзката е силно нелинейна.



Фигура 3.28 Зависимост на индукцията в пластината на Хол от разстоянието до проводника - сравнение на всички изследвани конструкции с концентратор и конструкция без концентратор

Изходното напрежение на пластината на Хол за една стойност на допълнителната въздушна междина на отворените сърцевини на концентраторите е показано на фигура 3.29.



Фигура 3.29 Изходно напрежение на пластината на Хол за тороидален магнитен концентратор с отворено ядро

3.4. Оптимизация на токовия сензор

Извършена е оптимизация на токовия сензор с тороидален магнитен концентратор с отворено ядро, за да се постигне връзка между изходния сигнал и позицията на проводника, която да е близка до линейна. Средната стойност на магнитната индукция в обема на сензора на Хол се счита за изходен сигнал. По този начин целевата функция е избрана да бъде коефициентът на определяне r^2 за модела на линейна регресия на отношението изходен сигнал (y) - позиция на проводника. Стратегията за оптимизация е реализирана в MATLAB, търсейки максимума на. Коефициентът на определяне се определя като

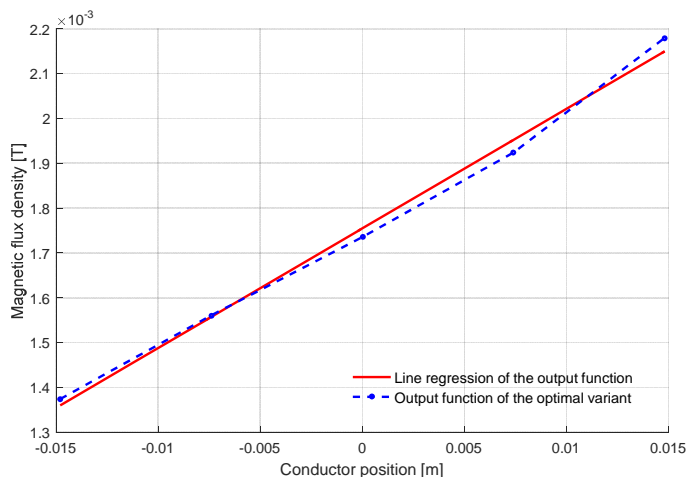
$$r^2 = (St - Sr) / Sr \quad (3.1)$$

където St е сумата от квадрата на разликите между y стойностите и средната стойност на y; Sr е сумата от квадрата на остатъците, като остатъкът е разликата между стойностите, изчислени от МКЕ, и предсказаните стойности от регресионната крива. Стойността на коефициента на детерминация варира между 0 и 1, като 1 е най-доброто съвпадение между първоначалната връзка и регресионната линия. Базата данни с изчислени резултати от модели по МКЕ се прехвърля в MATLAB за получаване на модели на линейна регресия. Използват се три параметъра за оптимизация x1, x2, x3. Тяхната дефиниция и диапазони са:

- Ширина на магнитопровода x1: $10 \text{ mm} \leq x1 \leq 20 \text{ mm}$;
- Височина на магнитопровод x2: $10 \text{ mm} \leq x2 \leq 20 \text{ mm}$;
- Допълнителна въздушна междина x3: $1 \text{ mm} \leq x3 \leq 15 \text{ mm}$.

Оптимизацията се извършва, като се запазва същата стойност на тока (10А) и същата стойност на вътрешния диаметър на магнитопровода (40 мм). Използван е методът на системното търсене, като се задават няколко нива за всеки от

параметрите за оптимизация в рамките на техния диапазон на вариация. Оптималното решение е получено при $x_1 = 20 \text{ mm}$, $x_2 = 20 \text{ mm}$, $x_3 = 15 \text{ mm}$, т.е. в ъгъла на пространството на параметрите. Стойността на коефициента на определяне за оптималния вариант е $r^2 = 0,9942$. Отношението изходен сигнал - позиция на проводника за оптималния вариант е показано на фигура 3.30, където е даден и моделът на линейна регресия.



Фигура 3.30. Зависимост на индукцията в пластината на Хол от позицията на проводника за оптималния вариант

3.5. Основни изводи от глава 3

Магнитните концентратори със затворен магнитопровод не дават независимост на положението на проводника. Въвеждането на магнитен концентратор от незатворен тип води до почти линейна зависимост на изходния сигнал от разстоянието до проводника. Създадените параметрични компютърни модели за конструкциите на токови сензори на Хол с допълнителни магнитни концентратори с отворено магнитопровод дават възможност за изследване на влиянието на различни параметри на концентратора, като например различни размери и материали. Използването на магнитния концентратор с отворен магнитопровод води до почти линейна зависимост на изходния сигнал от разстоянието между проводника и пластината на Хол. Извършена е оптимизация на токовия сензор с отворен магнитен концентратор за получаване на по-добри характеристики на сензора. По този начин тази зависимост е значително намалена по отношение на конструкцията без концентратор.

ГЛАВА ЧЕТВЪРТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИ ИЗСЛЕДВАНИЯ

В настоящата глава са извършени експериментални изследвания с използване на източници на променлив и постоянен ток. Сензорите на Хол са разположени в съответствие с направлението на магнитното поле. Токовете при прилагане на различни натоварвания, бяха измерени едновременно по три начина - с амперклеци, с токов трансформатор, и със сензори на Хол.

Изследванията бяха направени със скорост 2 Msps със софтуер, разработен за тези цели. Използван е и Rigol DS1104 - 4-канален осцилоскоп с висока скорост

с 1 G samples / s. Целта тук е да се уловят фазовите разлики, които могат да възникнат.

Освен това бяха направени измервания с МЕМС токов сензор ACS711, но чувствителността му остана ниска за прилагането на интегриран сензор с по-прецизен и по-широк капацитет за измерване на спектъра...

4.1. Изследване на зависимостта от разстоянието

При това изследване за еталон е използван неодимов магнит. Направени са измервания чрез приближаване на еталонния магнит до сензора с интервали от 5 mm. Изследванията са направени за няколко сензора. Получени са резултати и са представени в графичен вид.

4.2. Мултисензорен подход

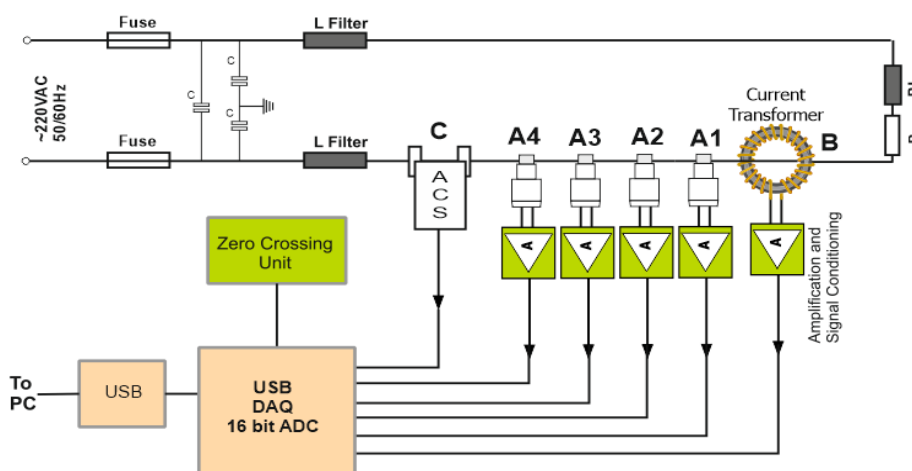
В настоящия раздел е реализиран мултисензорен подход, илюстриран на фиг. 4.18, използващ сензори с ефект на Хол при нива 5.0 mV /Gs, 3.125 mV / Gs и 2.5 mV / Gs, -11 mV / mT - +45 mV / mT. В допълнение, схемата е проектирана така, че коефициентите на усилване на всички сензори да са с еднаква линейност..



Фигура 4.18. Мултисензорно разположение на сензори на Хол

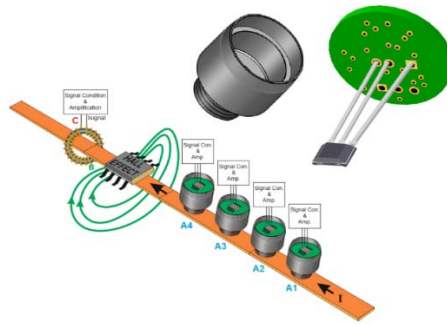
4.3. Изпълнение на хардуера на токов сензор с ефект на Хол

Структурата на хардуера, изпълнен с помощта на сензори на Хол на различни нива, е показана на фигура 4.19



Фигура 4.19 Структура на хардуера

A1324, a1325, A1326, EM3242, DRV5053 Hal® 83x, MLX90242, SS496, US1881 сензори са използвани като сензори за проектиране, показани като A1-A4 на фигура 4.21 за интегрираното сензорно оборудване, насочено като част от изследването. Целта тук е да може да се открият загубите на сензори в различни региони и да се създаде целенасочен, многозонов линеен сензор..



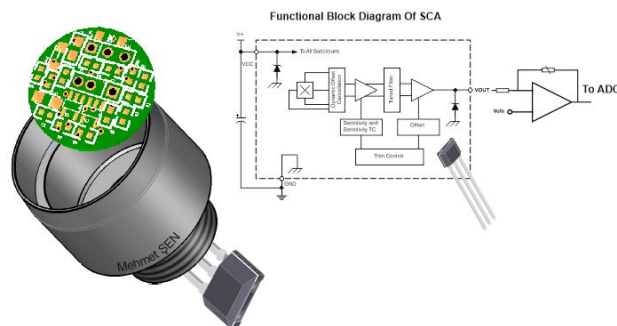
Фигура 4.21 Сравнима многосензорна структура

За сензорите, показани на фигура 4.21 между A1 и A4, разработената алуминиева структура на корпуса дава възможност за ъглова степен на свобода с кръглата си форма. За по-точно измерване на ниски токове са необходими един и същи тип сензори с различна чувствителност, посочени като A1-A4.

В допълнение са предвидени сензор за ток с ефект на Хол, означен с В и сравнение с използването на тороид, означен с С. Целта тук е да се сравни стойността на тока, получена от сензори между A1 и A4 с чувствителността на други сензори..

Показани са подробности за алуминиевата структура на корпуса и за сензорите, означени на фигура 4.21 с A1 до A4.

Използваните сензори на Хол бяха 0 Tesla, като отместването по напрежение, съдържащо се в тях, беше премахнато и беше добавена схема за използване на пълния обхват. Блоковата схема на разработената електронна схема е показана на фигура 4.24.

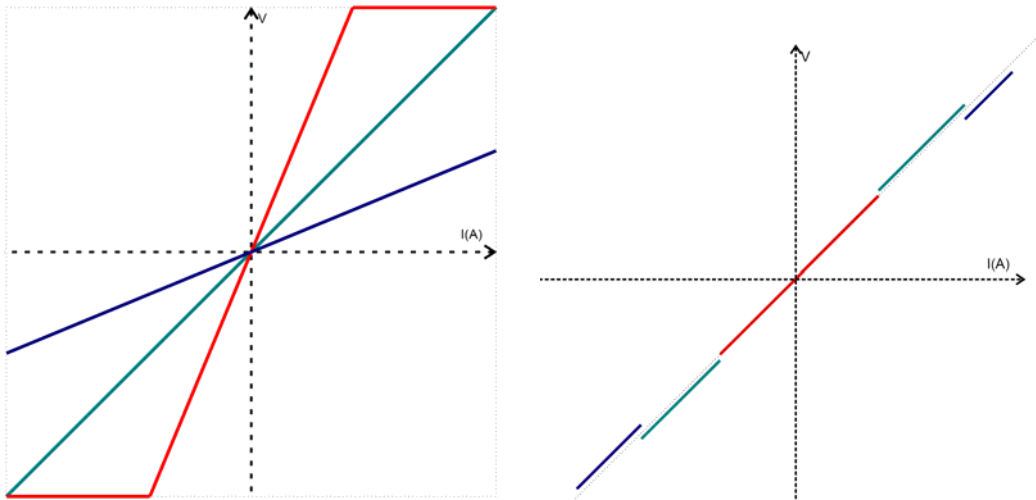


Фигура 4.24 Блок-схема на хардуера на сензора

4.4 Софтуерни подходи за подобряване на линейността

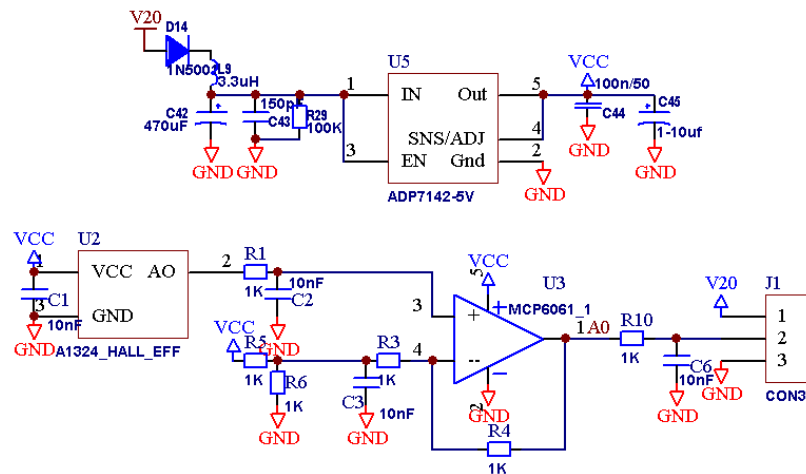
В този раздел е представен различен подход от настоящите методи за измерване. За да се демонстрира работата на подобрената архитектура, е разработен компютърно базиран софтуер за филтриране и анализ. По-специално са разработени софтуерни решения като филтриращи хармоници. Фигура 4.26 хардуер и софтуер Structure. Чувствителността за a1324, A1325, A1326 също е 5.0 mV / g, 3.125 mV / G и 2.5 mV / G, а стойностите на удовлетворение спрямо тока са показани една спрямо друга. A1325 дава по-линейни резултати при по-ниски токове при най-голямата си стойност, докато A1326 в същото списание Current Magazine все още е далеч от стойността си на удовлетворение. Но чувствителността му намалява.

С веригата за усилване и изместване на отместването, показана на фигура 4.27, наклоните за различните области се изравняват. В резултат на това бяха получени графики на фигура 4.28.



Фигура 4.27 A1324, A1325, A1326 Фигура 4.28 Обхвати A1324, A1325, A1326

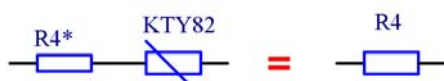
Подобрената и показана на фигура 4.33 усилвателна верига беше разработена и същите усилвания на изходното напрежение бяха постигнати при едни и същи стойности на индукцията за сензорите A1324, A1325, A1326, SS496X. LDO с ниско ниво на шум (ADP7142-5V) е използван за намаляване на шума по веригата. Диаметърът на веригата е 23 мм върху проектираната двуслойна печатна платка. Rc2 е привидното съпротивление на кондензатора C2.



Фигура 4.33 Хардуерна схема

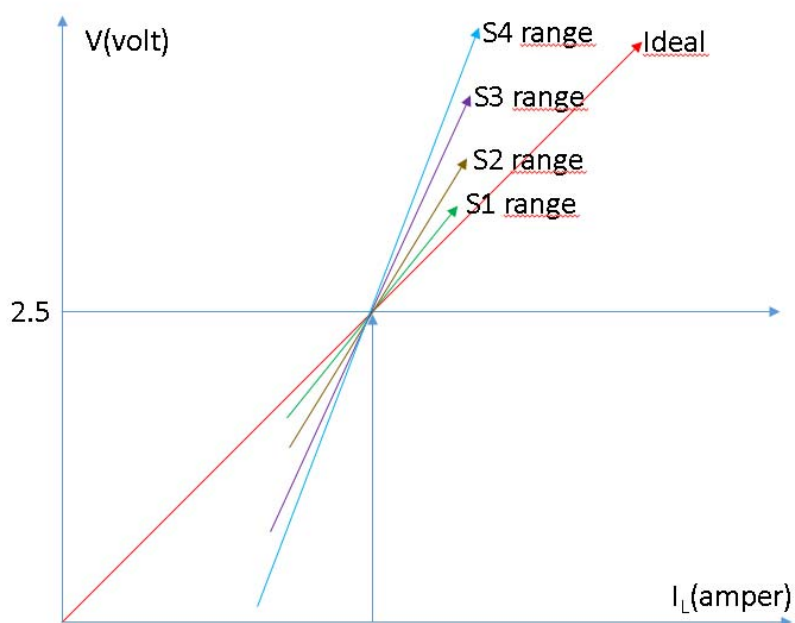
$$V_{out} = \left(\frac{R3 + R4}{R3} \right) \left(\frac{Rc2}{Rc2 + R1} \right) * VB - \left(\frac{R4}{R3} \right) * VA$$

Термичната компенсация се осигурява чрез свързване на сериен КТУ82 към съпротивлението R4 на фигура 4.34.



Фигура 4.34, Свързване на сериен KTY82 към съпротивлението R4

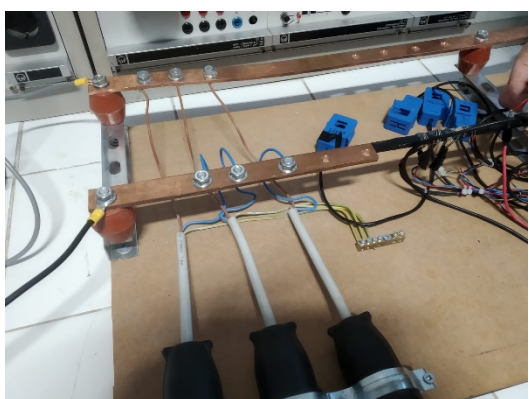
С веригата показана на фигура 4.33, наклоните за различните области се изравняват. В резултат на това бяха получени графиките на Фигура 4.35.



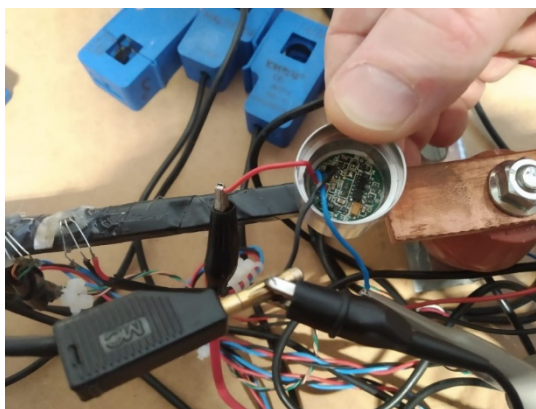
Фигура 4.35 Мащабирано изходно напрежение на сензори A1324, A1325, A1326, SS496X от веригата

Използваният мултисензорен подход и допълнителна софтуерна линейаризация осигуряват по-точни измервания в по-широк обхват на измервания ток.

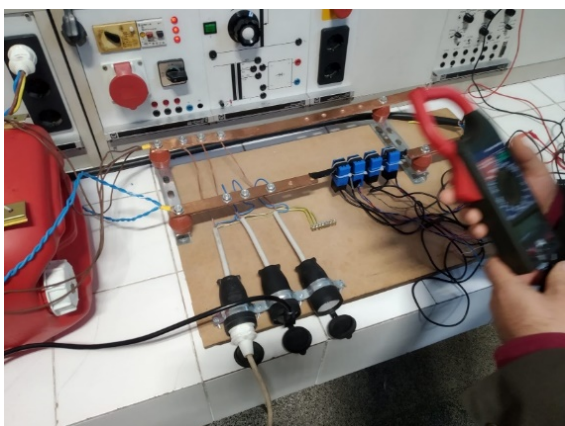
По-долу са дадени изображения на експерименталната установка.



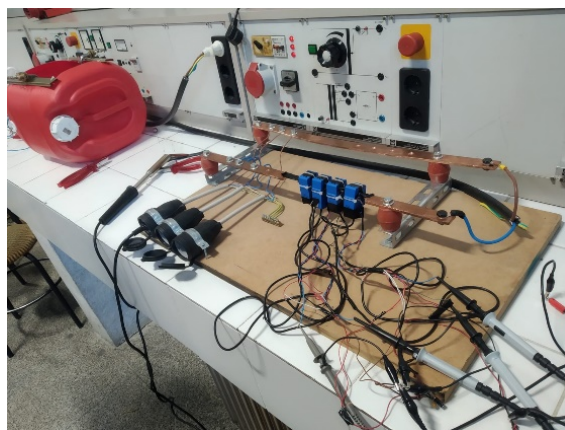
Фигура 4.36. Сензори на Хол поставени директно



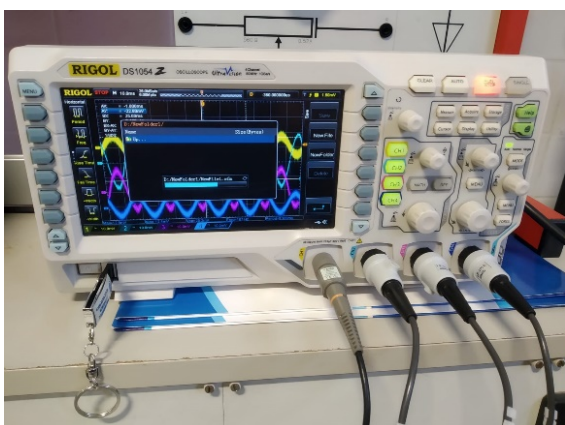
Фигура 4.37. Сензор на Хол поставен директно (с корпус)



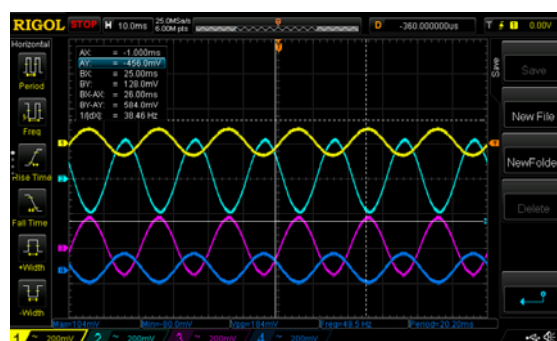
Фигура 4.39. При променлив ток



Фигура 4.40. При променлив ток



Фигура 4.42. Изглед на осцилоскопа

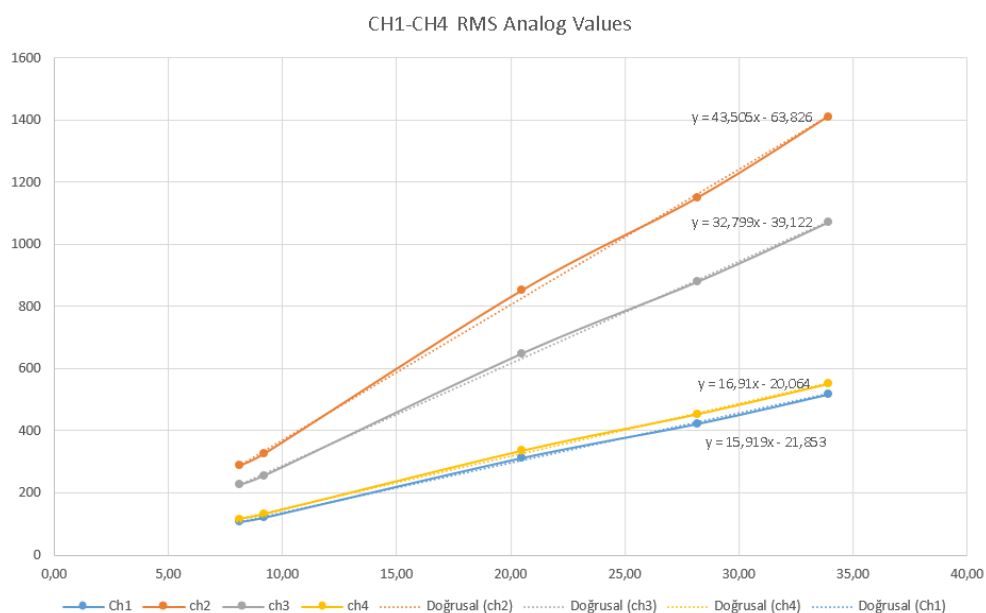


Фигура 4.44. Измерени стойности

Резултатите от експеримента с директно позициониране на сензора са показани в таблица 4.4, както и данните от амперметъра и осцилоскопа.

Таблица 4.4 Измерени стойности при директно позициониране на сензора.

No	File Name	Method	Current(A)	Ch1	Ch2	Ch3	Ch4
1	New3	Direct	8,10	107	288	226	116
2	New5	Direct	9,20	121	327	256	132
3	New6	Direct	20,50	313	852	649	336
4	New7	Direct	28,20	423	1150	880	454
5	New8	Direct	33,90	517	1410	1070	551



Фигура 4.45. CH1-CH4 RMS стойности от осцилоскоп

Стойностите, взети при директно позициониране, и изходите на сензорите бяха измерени линейно. Нелинейните отклонения са отклонения, причинени от недостатъчно точно позициониране на сензорите. Съответно наклоните и константите на стойностите Ch2, Ch3, Ch4 един спрямо друг се изчисляват, както следва спрямо стойността в Ch1.

$$\text{Ch2} = \text{Ch1} * m2 + k2$$

$$\text{Ch3} = \text{Ch1} * m3 + k3$$

$$\text{Ch4} = \text{Ch1} * m4 + k4$$

Резултатите от експеримента за позициониране на сензор с феритен магнитопровод са показани в таблица 4.5, както и данните от амперметъра и осцилоскопа.

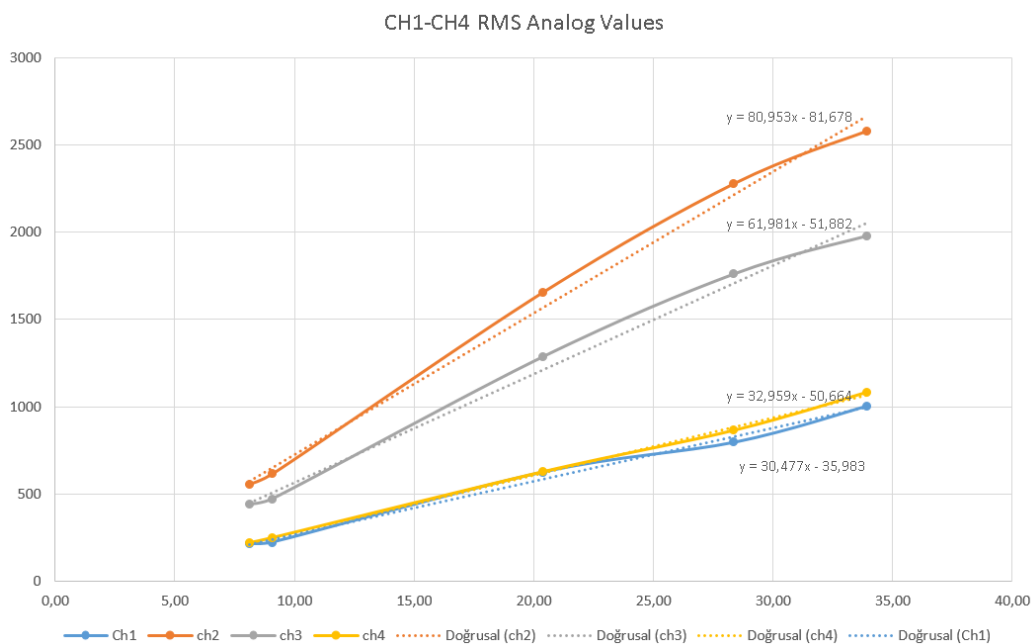
Таблица 4.5 Измерени стойности при използване на феритен концентратор

No	File Name	Method	Current(A)	Ch1	Ch2	Ch3	Ch4
1	New3s	Slotted	8,10	214	554	439	219
2	New5s	Slotted	9,10	223	616	473	249
3	New6s	Slotted	20,40	626	1655	1286	627
4	New7s	Slotted	28,40	797	2278	1760	864
5	New8s	Slotted	33,90	1004	2576	1975	1081

Резултатите са представени в графичен вид на фигура 4.46.

В същото време сензорът е удовлетворен по-рано при позициониране върху феритния магнитопровод. В този случай беше осигурено по-икономично,

по-малко и по-линейно измерване, без да е необходимо използването на феритен магнитопровод. На места като приложения с променлив ток или където се изисква измерване на високоскоростен ток, RMS времето за изчисление може да се извърши в рамките на определен период от време.



Фигура 4.46. CH1-CH4 RMS стойности от осцилоскоп

Всички измервания са извършени при температура 25-27 °C с посочената на Фигура 4.34 топлинна компенсация с КТУ82 връзка към R4.

Експерименталните данни са получени за 24 различни тока.

4.5. Основни изводи от глава 4

Направените експерименти с еталонен постоянен магнит потвърждават зависимостта на изходния сигнал на сензора на Хол от разстоянието до проводника.

Предложен е мултисензорен подход, при който се използват едновременно няколко сензора с различна чувствителност.

Разработен е хардуер и софтуер, реализиращ мултисензорния подход, като е получена линейна характеристика в широк обхват на изменение на измервания ток.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящия дисертационен труд са проведени теоретични и експериментални изследвания на токови сензори, базирани на ефект на Хол.

Основните приноси в дисертацията може да бъдат обобщени, както следва:

1. Компютърен модел, използващ метода на крайните елементи, е разработен и използван за анализ на магнитно и електрическо поле в токов сензор, базиран на ефект на Хол, и е оценено влиянието на различни геометрични параметри на пластината на Хол върху характеристиките на сензора.

2. Разработени са триизмерни параметризирани модели чрез метода на крайните елементи за анализ на магнитното поле на токов сензор, базиран на ефекта на Хол, с правоъгълни и тороидални магнитни концентратори с отворен и затворен магнитопровод. Използвайки разработените модели е оценено влиянието на различни геометрични параметри върху зависимостта на изходния сигнал от разстоянието до проводника и са идентифицирани значимите параметри.

3. Извършена е оптимизация на токов сензор с тороидален магнитен концентратор с отворен магнитопровод, с цел постигане на максимално близка до линейна зависимост между изходния сигнал и положението на проводника, като целевата е избрана да бъде да бъде коефициентът на определяне за модела на линейна регресия на зависимостта изходен сигнал - позиция на проводника.

4. Установено е, че използването на мултисензорен подход с няколко сензора на Хол с различна чувствителност намалява нелинейните грешки в системата. С използването на няколко сензора на Хол обхватът на измерване е разширен и е осигурена възможност за по-прецизни измервания в по-широк диапазон на входната величина.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ДИСЕРТАЦИЯТА

1. Mehmet Sen, Iosko Balabozov, Ivan Yatchev, Ratcho Ivanov
MODELLING OF CURRENT SENSOR BASED ON HALL EFFECT
15th International Conference on Electrical Machines, Drives and Power Systems, ELMA 2017 - Proceedings, art. no. 7955485, 2017, pp. 457-460. DOI: 10.1109/ELMA.2017.7955485
*Web of Science, Scopus, **SJR 0.13*** *6 цитирания в Scopus*
2. Ivan Yatchev, Mehmet Sen, Iosko Balabozov, Ivan Kostov
INFLUENCE OF MAGNETIC CONCENTRATOR ON HALL EFFECT BASED CURRENT SENSOR
COMPEL - The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering, vol. 37, No. 4, 2018, pp. 1481-1488.
*Web of Science, Scopus, **IF 0.755, SJR 0.26*** *1 цитиране в Scopus*
3. Ivan Yatchev, Mehmet Sen, Iosko Balabozov, Ivan Kostov
MODELLING OF A HALL EFFECT-BASED CURRENT SENSOR WITH AN OPEN CORE MAGNETIC CONCENTRATOR
Sensors (Switzerland), vol. 18, No. 4, 2018, art. no. 1260
*Web of Science, Scopus, **IF 3.576, SJR 0.64*** *6 цитирания в Scopus*
4. Mehmet Sen, Iosko Balabozov, Krastyo Hinov, Boyan Ivanov, Ivan Yatchev
EXPERIMENTAL STUDY OF CURRENT SENSORS BASED ON THE HALL EFFECT
Proceedings of Technical University of Sofia, ISSN 1311-0829, vol. 68, No. 1, 2018, pp. 249-254.
5. Mehmet Şen, Basri Kul
IOT-BASED WIRELESS INDUCTION MOTOR MONITORING
26th International Scientific Conference Electronics, ET 2017 - Proceedings, 2017-January, pp. 1-5. DOI: 10.1109/ET.2017.8124386
Web of Science, Scopus *12 цитирания в Scopus*

Investigation of Current Sensor Based on Hall Effect

Author: M. Sc. Eng. Mehmet SEN

In the present PhD thesis, computer modelling and experimental studies of current sensors based on Hall effect have been carried out. For modelling of the magnetic field, three-dimensional finite element method has been employed using COMSOL software. The computer modelling has been realized both for the sensor itself and for the magnetic field created by the real currents. In order to decrease the dependence on the distance to the conductor, the influence of different magnetic concentrators and their parameters has been evaluated.

A total linear structure was studied by characterizing regional measurements with a combination of sensors of different magnetic sensitivity, going to the use of low-cost multi-sensors. In addition, software filters and algorithms have been developed and software methods have been developed to reduce the EMI effect from outside.

The main contribution in the thesis can be summarized as follows:

1. Computer model using the finite element method has been developed and employed for analysing magnetic and electric field in a Hall effect based current sensor and influence of different geometric parameters of the Hall plate has been estimated.

2. Three-dimensional parametric finite element models have been developed for analysing the magnetic field of Hall effect based current sensor with open and closed core rectangular and toroidal magnetic concentrators. Using the developed models, influence of different geometric parameters on the dependence of the signal on the distance to the conductor is evaluated and the significant parameters are identified.

3. Optimization of the current sensor with open core toroidal magnetic concentrator has been carried out in order to achieve the relationship between the output signal and the position of the conductor to be close to a linear one, choosing the objective function to be the coefficient of determination for the linear regression model of the relationship output signal – conductor position.

4. It was found that the use of multiple Hall effect sensors of different sensitivity reduced non-linearity errors caused by the system. With the use of multiple Hall effect sensors, the measurement range has been expanded and more precise measurement in a wider spectrum has been revealed.