

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ
ННІ ЕНЕРГЕТИКИ, АВТОМАТИКИ І ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ

УДК 621.318:681.527.87

ПОГОДЖЕНО

Директор Навчально-наукового
інституту енергетики, автоматики
і енергозбереження
(назва ННІ)

_____ Каплун В.В. _____
(підпис) (ПІБ)

“ ” _____ 2025 р.

ДОПУСКАЄТЬСЯ ДО ЗАХИСТУ

Завідувач кафедри
електротехніки, електромеханіки
та електротехнологій
(назва кафедри)

_____ Окушко О.В. _____
(підпис) (ПІБ)

“ ” _____ 2025 р.

МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему «ДОСЛІДЖЕННЯ ОСОБЛИВОСТЕЙ РОЗПОДІЛУ
ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПОЛІВ В КОТУШКАХ НИЗЬКОВОЛЬТНИХ
ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ КОНТАКТОРІВ»

Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»
(код і назва)

Освітня програма Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
(назва)

Орієнтація освітньої програми освітньо-наукова
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Гарант освітньої програми

_____ Кривонос В.Є. _____
(науковий ступінь та вчене звання) (підпис) (ПІБ)

Керівник магістерської кваліфікаційної роботи

_____ Сорокін Д.С. _____
(науковий ступінь та вчене звання) (підпис) (ПІБ)

Виконав

_____ Дяченко В.В. _____
(підпис) (ПІБ студента)

КИЇВ – 2025

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ
ННІ ЕНЕРГЕТИКИ, АВТОМАТИКИ І ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ

ЗАТВЕРДЖУЮ

**Завідувач кафедри електротехніки,
електромеханіки та електротехнологій**

к.т.н., доцент Окушко О.В.
(науковий ступінь, вчене звання) (підпис) (ПІБ)
“ ” 2025 року

З А В Д А Н Н Я

ДО ВИКОНАННЯ МАГІСТЕРСЬКОЇ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ СТУДЕНТУ

Дяченку Владиславу Вікторовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

(код і назва)

Освітня програма Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

(назва)

Орієнтація освітньої програми освітньо-наукова

(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Тема магістерської кваліфікаційної роботи «Дослідження особливостей розподілу
електромагнітних полів в котушках низьковольтних електромагнітних
контакторів»

затверджена наказом проректора НУБіП України від 26.09.2024 р. №1665 «С»

Термін подання завершеної роботи на кафедру 15.05.2025

Вихідні дані до магістерської кваліфікаційної роботи: нормативно-технічна документація,
каталоги обладнання

Перелік питань, що підлягають дослідженню:

1. Аналіз конструктивних особливостей електромагнітних систем сучасних
електромагнітних низьковольтних контакторів

2. Умови вибору та розрахунок низьковольтних електромагнітних контакторів

3. Моделювання електромагнітних полів в котушках низьковольтних електромагнітних
контакторів

4. Дослідження особливостей розподілу електромагнітного поля в котушках
низьковольтних електромагнітних контакторів

5. Правила техніки безпеки при експлуатації та монтажі низьковольтних
електромагнітних контакторів

Перелік графічного матеріалу (за потреби)

Дата видачі завдання 27.09.2024 р.

Керівник магістерської кваліфікаційної роботи

(науковий ступінь та вчене звання)

(підпис)

Сорокін Д.С.

(прізвище та ініціали)

Завдання прийняв до виконання

(підпис)

Дяченко В.В.

(прізвище та ініціали студента)

РЕФЕРАТ

Дяченко В.В. «Дослідження особливостей розподілу електромагнітних полів в котушках низьковольтних електромагнітних контакторів» (магістерська кваліфікаційна робота, Київ, Національний університет біоресурсів і природокористування України, 2025 р.). Пояснювальна записка: 70 сторінок, 6 таблиць, 25 рисунків, 43 використаних джерел.

Магістерська кваліфікаційна робота присвячена аналізу електромагнітних процесів у котушках низьковольтних електромагнітних контакторів з метою підвищення ефективності їхньої роботи, зниження втрат та забезпечення стабільності електромагнітного спрацювання.

У роботі проведено аналіз конструктивних особливостей електромагнітних систем сучасних контакторів, розглянуто їх класифікацію, принцип дії, умови вибору та ключові технічні характеристики. Вибрано модель LC1D12 фірми Schneider Electric як об'єкт дослідження, здійснено її обґрунтування та підготовку геометричних і електричних параметрів для подальшого моделювання.

У середовищі **QuickField** побудовано модель розподілу магнітного поля в котушці. Проведено розрахунки з урахуванням магнітних властивостей матеріалів, граничних умов і сітки скінченних елементів. Отримано карти розподілу магнітної індукції, напрямків силових ліній та графіки індукції по характерних осях.

Результати чисельного моделювання дозволили оцінити зони концентрації поля, визначити максимальні значення індукції, напруженості та густини енергії, а також провести порівняння з теоретичними очікуваннями.

У роботі також приділено увагу питанням охорони праці при експлуатації контакторів та моделюванні електромагнітних полів.

Ключові слова: електромагнітне поле, контактор, котушка, магнітна індукція, моделювання, електромагнітна система.

Dyachenko V.V. “Investigation of the Features of Electromagnetic Field Distribution in Coils of Low-Voltage Electromagnetic Contactors” (Master's Thesis, Kyiv, National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, 2025). Explanatory Note: 70 pages, 6 tables, 25 figures, 43 references.

The master's thesis is devoted to the analysis of electromagnetic processes in the coils of low-voltage electromagnetic contactors in order to improve their operational efficiency, reduce losses, and ensure the stability of electromagnetic actuation.

The work includes an analysis of the structural features of the electromagnetic systems of modern contactors, their classification, principle of operation, selection criteria, and key technical characteristics. The LC1D12 model by Schneider Electric was selected as the research object. Its selection is justified and the geometric and electrical parameters are prepared for further modeling.

A model of the magnetic field distribution in the coil was built using the QuickField software. Calculations were performed considering the magnetic properties of materials, boundary conditions, and finite element mesh. Maps of magnetic induction distribution, direction of field lines, and induction graphs along characteristic axes were obtained.

The results of the numerical simulation made it possible to assess the areas of field concentration, determine the maximum values of magnetic induction, field intensity, and energy density, and compare them with theoretical expectations.

The work also addresses occupational safety issues during the operation of contactors and the simulation of electromagnetic fields.

Keywords: electromagnetic field, contactor, coil, magnetic induction, modeling, electromagnetic system.

ЗМІСТ

ВСТУП	7
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ КОНСТРУКТИВНИХ ОСОБЛИВОСТЕЙ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ СИСТЕМ СУЧАСНИХ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ НИЗЬКОВОЛЬТНИХ КОНТАКТОРІВ	9
1.1. Загальні відомості про низьковольтні електромагнітні контактори.	9
1.2. Класифікація контакторів	10
1.3. Конструктивні елементи електромагнітного контактора Будова електромагнітного контактора складається з кількох основних частин, кожна з яких виконує свою функцію.	12
1.4. Принцип роботи електромагнітних систем контакторів.	14
1.5. Особливості інтеграції контакторів у сучасні електричні мережі.	15
1.6. Параметри, що впливають на ефективність роботи електромагнітних систем.	16
Висновки до розділу 1	17
РОЗДІЛ 2 УМОВИ ВИБОРУ ТА РОЗРАХУНОК НИЗЬКОВОЛЬТНИХ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ КОНТАКТОРІВ.	18
2.1. Основні умови вибору електромагнітного контактора.	18
2.2. Розрахунок основних складових електромагнітних контакторів	23
2.3. Розрахунок комутуючих контактів	29
2.4. Розрахунок параметрів короткого замикання	32
Висновки до розділу 2	33
РОЗДІЛ 3 МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПОЛІВ В КОТУШКАХ НИЗЬКОВОЛЬТНИХ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ КОНТАКТОРІВ	34
3.1 Огляд програмного забезпечення QuickField	34
3.2 Геометричні параметри	35
3.3 Електричні параметри	36
3.4 Магнітні властивості матеріалів	37
3.5 Граничні умови	37
3.6 Мережа скінченних елементів	38
3.7 Аналіз геометрії та параметрів котушки	39
3.9 Порядок моделювання розподілу магнітного поля в котушці електромагнітного контактора у середовищі QuickField	40
Висновки до розділу 3	44

РОЗДІЛ 4. ДОСЛІДЖЕННЯ ОСОБЛИВОСТЕЙ РОЗПОДІЛУ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ПОЛЯ В КОТУШКАХ НИЗЬКОВОЛЬТНИХ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ КОНТАКТОРІВ	45
4.1 Розподіл магнітного векторного потенціалу A (Вб/м)	45
4.2 Розподіл магнітної індукції B (Тл)	47
4.3 Розподіл напруженості магнітного поля H (А/м)	50
4.4 Розподіл об'ємної густини магнітної енергії w (J/м ³)	52
4.5 Аналіз похибок та достовірності результатів моделювання	55
4.6 Порівняльний аналіз отриманих параметрів у різних ділянках конструкції	57
Висновки до розділу 4	58
РОЗДІЛ 5. ПРАВИЛА ТЕХНІКИ БЕЗПЕКИ ПРИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ТА МОНТАЖІ НИЗЬКОВОЛЬТНИХ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ КОНТАКТОРІВ	59
5.1 Загальні вимоги з охорони праці	59
5.2 Вимоги під час дослідження або лабораторної перевірки	59
5.3 Заземлення та перевірка захисних засобів	60
5.4 Обслуговування контактної системи	62
5.5 Умови безпечної експлуатації у складних середовищах	62
5.6 Інструкції та документація з безпеки	63
Висновки до розділу 5	64
ВИСНОВКИ	65
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	67

ВСТУП

Мета роботи – вивчення особливостей розподілу електромагнітних полів у котушках низьковольтних електромагнітних контакторів.

Об'єкт дослідження – електромагнітна система сучасних низьковольтних контакторів.

Предмет дослідження – специфіка розподілу магнітного поля в їх котушках.

Для досягнення поставленої мети визначені такі завдання:

1. Аналіз конструктивних особливостей електромагнітних систем сучасних електромагнітних низьковольтних контакторів.
2. Умови вибору та розрахунок низьковольтних електромагнітних контакторів.
3. Моделювання електромагнітних полів у котушках низьковольтних електромагнітних контакторів.
4. Дослідження особливостей розподілу електромагнітного поля в котушках контакторів.
5. Дотримання правил техніки безпеки при експлуатації та монтажі низьковольтних електромагнітних контакторів.

Низьковольтні електромагнітні контактори відіграють ключову роль у системах управління та захисту електричних мереж. Вони забезпечують високу надійність роботи, універсальність застосування та легкість інтеграції в сучасні розподільні пристрої. Їх функціонування базується на електромагнітних процесах, які відбуваються в котушках, що створюють магнітне поле для активації контактної системи. Саме особливості розподілу цього магнітного поля мають вирішальне значення для ефективності роботи контакторів, їх енергетичних характеристик та довговічності.

Дослідження розподілу електромагнітних полів у котушках є актуальним, оскільки дозволяє оптимізувати параметри конструкції, знизити енергетичні втрати, забезпечити безпечну експлуатацію та підвищити надійність

обладнання. Це, своєю чергою, сприяє сумісності з іншими пристроями та стабільності роботи систем управління як у побутових, так і в промислових умовах.

Крім того, аналіз розподілу магнітного поля має важливе значення для розвитку нових технологій і матеріалів. Удосконалення конструкції котушок і магнітопроводів дозволяє зменшити габарити та масу пристроїв, спростити їх монтаж, зберігаючи водночас високу ефективність і низький рівень енергоспоживання. Такі дослідження є основою для створення більш економічних і надійних технічних рішень у галузях автоматизації, енергетики та транспорту.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ КОНСТРУКТИВНИХ ОСОБЛИВОСТЕЙ

ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ СИСТЕМ СУЧАСНИХ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ

НИЗЬКОВОЛЬТНИХ КОНТАКТОРІВ

1.1. Загальні відомості про низьковольтні електромагнітні контактори.

Контактор — це двопозиційний електромагнітний апарат, призначений для частих дистанційних включень силових електричних кіл у нормальному режимі роботи. Він використовується для комутації силових електричних кіл, а його контакти замикаються або розмикаються під впливом електромагнітного приводу.

Основна функція контактора полягає в здійсненні електричної комутації, тобто замиканні або розмиканні силового кола при подачі керуючого сигналу. У найпростішому вигляді електромагнітний контактор виконує роль електричного вимикача, керованого за допомогою магнітного поля, що створюється у котушці при протіканні електричного струму.

Контактори відрізняються високою зносостійкістю, що дозволяє здійснювати до сотень тисяч або навіть мільйонів циклів комутації. Це обумовлено наявністю спеціальних матеріалів контактних поверхонь та оптимізованої конструкції магнітної системи. Сучасні моделі оснащуються додатковими допоміжними контактами, індикаційними елементами, інтерфейсами для інтеграції в системи моніторингу та керування (наприклад, SCADA або Smart Grid).

Низьковольтні контактори, як правило, застосовуються в колах із напругою до 1000 В і номінальними струмами до кількох тисяч ампер. Їх встановлюють у розподільних щитах, пускових комірках, шафах автоматики, а також як складові частини пускачів для керування електродвигунами. У побутових системах автоматизації (світло, вентиляція, опалення) використовуються модульні контактори, які монтуються на DIN-рейку.



Рис. 1.1. Загальний вигляд контактора

1.2. Класифікація контакторів

Контактори класифікуються за низкою технічних і конструктивних ознак, які визначають сферу їхнього застосування, електричні характеристики, принцип дії та особливості монтажу. Класифікація дозволяє ефективно підібрати пристрій для конкретної електричної схеми з урахуванням умов експлуатації, типу навантаження та рівня безпеки

Класифікація контакторів:

За типом струму: змінного (AC) та постійного (DC).

-**Контактори постійного струму** призначені переважно для комутації силових електричних кіл постійного струму за напруги до 220 В у разі частих спрацювань і до 600 В – у разі нечастих спрацювань. У таких апаратах використовують електромагніти постійного струму. Контактори постійного струму виконуються як однополюсні, так і двополюсні, із замикальними і розмикальними головними контактами.

-**Контактори змінного струму** призначені для комутації електричних кіл змінного струму напругою до 660 В. Електромагніти цих контакторів можуть бути виконані як змінного, так і постійного струму.

За кількістю полюсів: виділяють однополюсні, двополюсні, триполюсні та чотириполюсні контактори. Найбільш поширені — триполюсні, що призначені для керування трифазними електродвигунами або іншим трифазним обладнанням.

За конструктивним виконанням контактори розрізняють:

- Відкриті контактори, які призначені для монтажу всередині електрощитів.
- Корпусні, які мають захисний кожух.
- Модульні контактори, що монтуються на DIN-рейку в системах побутової автоматизації.

За способом комутації розрізняють нереверсивні та реверсивні контактори. Останні складаються з двох взаємоблокованих апаратів, що дозволяють змінювати напрямок обертання електродвигуна. Крім того, існують контактори з вбудованим тепловим реле для захисту від перевантаження.

За середовищем гасіння електричної дуги: повітряні, вакуумні та газонаповнені апарати.

Повітряні — найпоширеніші в промисловості; вакуумні — забезпечують високу зносостійкість і мінімальний об'єм; газонаповнені — ефективні при високих струмах у захищених системах.

За способом приведення в дію контактори поділяються на електромагнітні, пневматичні та електропневматичні. Пневматичні контактори використовують енергію стисненого повітря, яке подається вручну або автоматично, а електропневматичні — оснащуються електромагнітним клапаном, що активується електричним сигналом. Приклад схем цих типів контактів наведено на рис. 1.2.

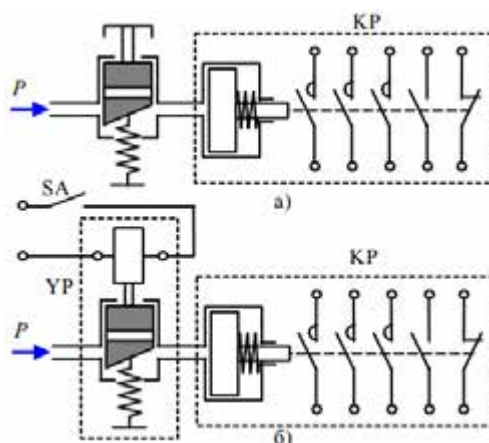


Рис. 1.2. Електромеханічні схеми пневматичного (а) та електропневматичного (б) контакторів

Різниця між пневматичним (рис. 1.2-а) та електропневматичним (рис. 1.2-б) контакторами, позначеними на схемах літерами КР, полягає у тому, що у першому випадку керування контактором здійснюється за допомогою пневматичного вентиля, до якого підводиться стиснене повітря з тиском Р і який приводиться у дію м'язовою енергією оператора, а у другому — за допомогою електромагнітного клапана УР, котушка якого підключається до джерела живлення через контакт вимикача керування SA. Керування може також здійснюватися електронними елементами. [1, 2]

1.3. Конструктивні елементи електромагнітного контактора

Будова електромагнітного контактора складається з кількох основних частин, кожна з яких виконує свою функцію.

Контактор складається з контактної системи, дугогасного пристрою, електромагніта та системи допоміжних контактів. Дугогасний пристрій використовується для гасіння електричної дуги, що утворюється при великих напругах. Основні технічні характеристики включають номінальний струм, номінальну напругу, зносостійкість, час включення та відключення. Робота контакторів часто супроводжується зносом контактів, тому важливе значення має якість дугогасного пристрою.

Котушка є ключовим елементом, що відповідає за створення магнітного поля, необхідного для приведення в дію магнітної системи. У контакторах змінного струму котушка має як активний, так і індуктивний опір, тоді як у контакторах постійного струму – лише активний. Цей елемент виготовляється з електротехнічних матеріалів із високою провідністю, що забезпечує мінімальні втрати енергії.

Контактна система включає головні та допоміжні контакти, які забезпечують комутацію кіл. Головні контакти призначені для роботи з силовими струмами, а допоміжні – для керування сигналами в колах

управління. Щоб запобігти пошкодженню контактів під час роботи на високих струмах, у системі застосовують дугогасильні камери, що знижують ризик утворення електричної дуги.

Механічна частина контактора включає пружини, які забезпечують повернення рухомих елементів у вихідне положення, та якір, який відповідає за передачу руху від магнітної системи до контактів. Також корпус контактора захищає внутрішні елементи від механічних пошкоджень і забруднень. [1, 2].

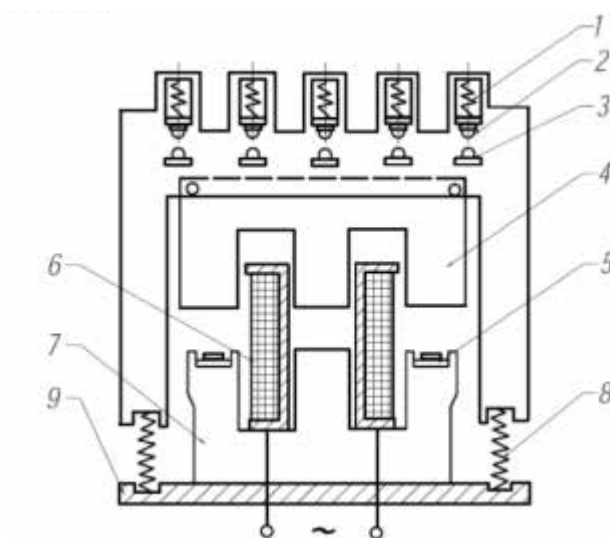


Рис. 1.3 Будова електромагнітного контактора з прямоходовою магнітною системою

На рис. 1.3 представлена принципова схема електромагнітного контактора з прямоходовою магнітною системою. Коли на котушку (6) подається напруга, створюється магнітне поле, що притягує якорь (4) до осердя (7). Цей рух викликає змикання рухомих контактів (2) з нерухомими (3), дозволяючи протікання струму в головному колі. Пружини (1, 8) забезпечують повернення системи у початкове положення при знеструмленні. Короткозамкнений виток (5) запобігає коливанням якоря. Уся система змонтована на основі (9), яка виконує функцію опори та монтажної частини пристрою.

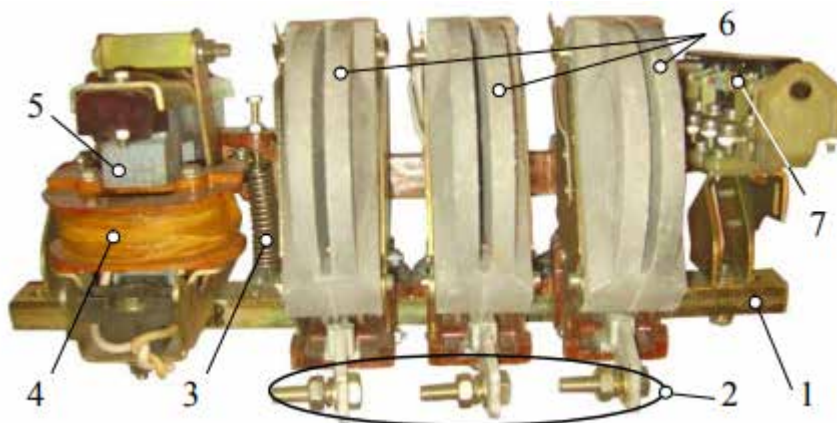


Рис. 1.4. Триполюсний електромагнітний контактор змінного струму

На рис. 1.4 показаний триполюсний електромагнітний контактор змінного струму. Видно основні компоненти пристрою, включаючи котушку (4), яка формує магнітне поле для притягування якоря (5). Коли якорь спрацьовує, контакти замикаються, пропускаючи струм через увідні термінали (2). Дугогасні камери (6) виконують функцію гасіння дуги, яка виникає при комутації. Пружина (3) повертає якорь у вихідне положення після відключення живлення. У верхній частині зображено блок допоміжних контактів (7), що використовується для керування, індикації або логічного блокування. Монтувальна рейка (1) забезпечує кріплення пристрою до щитового обладнання або панелі.

1.4. Принцип роботи електромагнітних систем контакторів.

Робота електромагнітного контактора ґрунтується на явищі електромагнітної індукції. При подачі електричного струму на котушку створюється магнітне поле, яке притягує якорь до осердя. Цей рух спричиняє механічне змикання контактів силового кола, через які протікає струм до навантаження.

Процес роботи контактора можна поділити на кілька етапів. На першому етапі, при подачі керуючої напруги, струм проходить через обмотку котушки, утворюючи магнітний потік. Магнітне поле втягує якорь, долаючи зусилля

пружини. При цьому рухомі контакти замикаються з нерухомими, і струм починає протікати в головному електричному колі.

Після зняття напруги з котушки магнітне поле зникає, і під дією повертальної пружини якір повертається у вихідне положення. Це спричиняє розмикання контактів, що розриває електричне коло. Таким чином здійснюється комутація – увімкнення або вимкнення навантаження.

У контакторах змінного струму для зменшення вібрацій і коливань якоря використовується короткозамкнений виток. Він забезпечує більш стабільну роботу та знижує шум під час спрацювання. У сучасних моделях можливе також використання електронного керування, що підвищує швидкодію та точність.

Контактори широко використовуються в системах автоматизації, електроприводах і розподілу електроенергії, де потрібна надійна комутація електричних кіл. [5]

1.5. Особливості інтеграції контакторів у сучасні електричні мережі.

Сучасні низьковольтні контактори інтегруються в системи автоматизації та управління електромережами завдяки їх модульній конструкції. Модульні контактори легко монтується на DIN-рейки, що забезпечує простоту встановлення та заміни. Вони використовуються у складі розподільчих щитів разом із пристроями захисту, такими як автоматичні вимикачі, реле контролю напруги та інші комутаційні апарати. [3]

Завдяки широкому діапазону напруги котушок контактори можуть застосовуватись у різних мережах – від низьковольтних побутових до промислових систем. Їхня компактність і надійність дозволяють створювати ефективні системи управління енергоспоживанням у будівлях, виробничих приміщеннях і транспортних засобах. [4]

Окрім того, сучасні контактори можуть бути інтегровані з системами моніторингу та управління через розширені комунікаційні інтерфейси, що забезпечує можливість віддаленого керування та налаштування. Це дозволяє

зменшити людський фактор при експлуатації та покращити енергетичну ефективність систем. Висока стійкість до електромагнітних завад та наявність вбудованих захисних функцій робить ці пристрої ідеальними для використання в умовах підвищених вимог до надійності та безпеки.

1.6. Параметри, що впливають на ефективність роботи електромагнітних систем.

Ефективність роботи електромагнітних систем контакторів визначається сукупністю електричних, механічних та конструктивних параметрів, які впливають на їх продуктивність, довговічність і стійкість до зовнішніх впливів.

Одним із основних електричних параметрів є **номінальна напруга котушки керування U_c** , яка забезпечує роботу магнітної системи. Електромагнітні контактори мають стабільно вмикатися при напрузі в межах 85–110% від U_c та вимикатися при напрузі 20–75% (змінний струм) або 10–75% (постійний струм) від U_c . Відхилення від цих меж може призвести до нестабільної роботи або пошкодження котушки.

Іншим важливим показником є **номінальна робоча напруга U_e** та **номінальний робочий струм I_e** , які характеризують параметри головного кола, для якого розрахований контактор. Перевищення допустимого струму призводить до перегріву контактів, ерозії, утворення зварювання контактних поверхонь та втрати працездатності.

Механічні параметри включають **зносостійкість пружин і розміри повітряного зазору** між осердям та якорем магнітної системи. Зменшення цього зазору покращує ефективність роботи магнітної системи, знижуючи струмові втрати, але водночас може збільшити ймовірність механічного зношення.

Одним із ключових параметрів є **теплові характеристики**. Вони визначають здатність елементів контактора розсіювати тепло, що виділяється при проходженні струму через контакти та котушку. Нагрівання котушки

впливає на її опір та стабільність магнітного поля, що може змінювати ефективність спрацьовування апарата. [5]

Ефективність роботи значною мірою залежить від **якісних характеристик матеріалів**, які використовуються у конструкції. Електротехнічна сталь із високими магнітними властивостями зменшує втрати енергії в осерді, а ізоляційні матеріали високої якості забезпечують стійкість до перегріву та механічних впливів.

Особливу увагу слід приділяти **тривалості електричної дуги** при розмиканні контактів. Використання дугогасильних пристроїв значно підвищує зносостійкість контактної системи, зменшуючи її нагрівання та зношення під час роботи.

Висновки до розділу 1

У першому розділі було проведено всебічний аналіз конструктивних особливостей електромагнітних систем сучасних низьковольтних контакторів. Розглянуто основні визначення, принцип дії та класифікацію контактних апаратів залежно від роду струму, призначення, кількості полюсів, типу приводу та ступеня захисту оболонки. Було з'ясовано, що сучасні контактори забезпечують високу надійність, зносостійкість і гнучкість інтеграції в системи керування.

Особливу увагу приділено конструкції магнітної системи, зокрема котушці, осердю та якірній частині. Саме ці елементи формують магнітне поле, яке визначає ефективність роботи контактора. Було наведено порівняльні характеристики електромагнітних, пневматичних та електропневматичних контакторів, а також їхню будову з ілюстраціями.

Узагальнення матеріалу дозволяє зробити висновок, що правильний вибір конструкції та матеріалів магнітної системи є запорукою стабільної роботи комутаційного обладнання. Отримані відомості є теоретичною основою для подальшого моделювання розподілу електромагнітного поля та оптимізації конструкції в середовищі QuickField.

РОЗДІЛ 2

УМОВИ ВИБОРУ ТА РОЗРАХУНОК НИЗЬКОВОЛЬТНИХ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ КОНТАКТОРІВ.

2.1. Основні умови вибору електромагнітного контактора.

Перед вибором контактора важливо враховувати, що його розміри визначають здатність пристрою працювати з потужнішими навантаженнями. Слід переконатися, що напруга котушки відповідає керуючій напрузі, а контакти здатні витримати навантаження від усіх підключених споживачів. Контактори поділяються на три класи комутаційної зносостійкості (А, Б, В), і рекомендується обирати модель із невеликим запасом цього параметра [1].

Для правильного вибору також необхідно врахувати умови експлуатації. Це дозволить визначити оптимальний ступінь захисту пристрою. Наприклад, для розміщення в електричній шафі підійде модель зі ступенем захисту IP20, тоді як для запилених або вологих приміщень краще обирати корпуси із захистом IP45 або IP65. Для захисту від перевантажень варто використовувати модулі із тепловими реле.

Для забезпечення надійного та ефективного керування асинхронним електродвигуном за допомогою електромагнітного контактора необхідно врахувати низку параметрів при його виборі [2]:

Номінальна напруга контактора

Контактор повинен відповідати напрузі електричної мережі, до якої його буде підключено. Номінальна напруга пристрою ($U_{\text{нп}}$) має дорівнювати або перевищувати робочу напругу мережі живлення ($U_{\text{мережі}}$). Формула перевірки:

$$U_{\text{нп}} \geq U_{\text{мережі}}$$

Номінальний робочий струм

Контактор повинен витримувати навантаження від електродвигуна. Його номінальний робочий струм ($I_{\text{нрп}}$) не повинен бути меншим за номінальний струм електродвигуна ($I_{\text{н.дв.}}$). Формула перевірки: $I_{\text{нрп}} \geq I_{\text{н.дв.}}$

Функціональне призначення

Залежно від схеми пуску двигуна обирають відповідний тип контактора: нереверсивний, реверсивний, з перемиканням обмоток «зірка–трикутник», з вбудованими засобами захисту (теплове реле або позистор).

Ступінь захисту оболонки (IP)

Контактори відрізняються ступенем захисту від пилу, вологи та механічних впливів:

IP20 — для електрощитів;

IP44–IP54 — для запилених або вологих приміщень;

IP65 — для промислових умов.

Кліматичне виконання та місце встановлення

Кліматичне виконання визначає здатність контактора функціонувати в певних кліматичних умовах, таких як температура, вологість, наявність агресивних середовищ тощо. Основні типи кліматичного виконання включають:

УХЛ (умови холодного клімату): призначені для експлуатації в помірному та холодному кліматі.

Т (тропічне виконання): призначені для експлуатації в тропічних умовах з високою вологістю та температурою.

Категорія розміщення вказує на умови встановлення контактора:

Категорія 1: встановлення на відкритому повітрі без захисту від атмосферних впливів.

Категорія 2: встановлення на відкритому повітрі з частковим захистом від атмосферних впливів.

Категорія 3: встановлення в неопалюваних приміщеннях.

Категорія 4: встановлення в опалюваних приміщеннях.

Категорії застосування контакторів описано в табл. 2.1

Категорії застосування контакторів

Категорія застосування	Типові використання
АС-1	Неіндуктивні або малоіндуктивні навантаження, резистивні печі
АС-2	Двигуни з фазним ротором: пуск, вимикання
АС-3	Двигуни з короткозамкненим ротором: пуск, вимикання під час обертання
АС-4	Двигуни з короткозамкненим ротором: пуск, гальмування протівимканням, поштовховий режим
АС-5a	Комутація газорозрядних ламп
АС-5b	Комутація ламп розжарювання
АС-6a	Комутація трансформаторів
АС-6b	Комутація конденсаторних батарей
АС-7a	Малоіндуктивні навантаження побутового та аналогічного призначення
АС-7b	Двигунові навантаження побутового призначення
АС-8a	Керування герметичними двигунами компресорів з ручним зведенням розчіплювачів перевантаження
АС-8b	Керування герметичними двигунами компресорів з автоматичним зведенням розчіплювачів перевантаження
ДС-1	Неіндуктивні або малоіндуктивні навантаження: пуск, резистивні печі
ДС-3	Двигуни паралельного збудження: пуск, гальмування протівимканням, поштовховий режим. Динамічне гальмування
ДС-5	Двигуни послідовного збудження: пуск, гальмування протівимканням, поштовховий режим. Динамічне гальмування
ДС-6	Комутація ламп розжарювання

Характеристики котушки керування

Котушка контактора живиться від кола керування. Її номінальна напруга (U_{кот.ном.}) має відповідати напрузі в колі керування (U_{кер}). Типовими є варіанти: 24 В ДС, 110 В АС, 220 В АС.

Комутаційна зносостійкість і частота вмикань

Режим експлуатації визначає потрібний клас зносостійкості:

виконання А — понад 400 включень/добу;

Б — 120–400 включень/добу;

В — до 120 включень/добу.

Після вибору контактора необхідно переконатися, що він відповідає вимогам відповідної категорії застосування, наприклад АС-3, яка передбачає роботу з асинхронними двигунами.

У межах категорії АС-3 магнітний пускач має забезпечувати ввімкнення струму в умовах нормального режиму комутації:

$$I_0 = 6 \cdot I_{\text{ном.р.}} \geq I_{\text{пуск.дв.}} \quad (2.1)$$

а в режимі рідких комутацій

$$I_0 = 10 \cdot I_{\text{ном.р.}} \geq I_{\text{пуск.дв.уд.}} \quad (2.2)$$

де $I_{\text{ном.р.}}$ – номінальний робочий струм електромагнітного пускача (комутаційного апарата).

Параметри вибору електромагнітного контактора для дистанційного керування трифазним асинхронним електродвигуном:

Для практичного обґрунтування вибору моделі контактора було розглянуто умови підключення трифазного асинхронного електродвигуна потужністю 5.5 кВт при напрузі 400 В.

Номінальний струм двигуна визначається за формулою:

$$I = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot U \cdot \cos\varphi \cdot \eta}, \text{ А.} \quad (2.2)$$

де:

- $P = 5.5$ кВт — потужність двигуна,
- $U = 400$ В — лінійна напруга,
- $\cos\varphi = 0.85$ — коефіцієнт потужності,
- $\eta = 0.88$ — ККД двигуна.

Підставивши значення:

$$I = \frac{5500}{\sqrt{3} \cdot 400 \cdot 0.85 \cdot 0.88} \approx 10.5, \text{ А.}$$

Таким чином, для забезпечення надійного вмикання та вимикання двигуна з таким струмом оптимальним є контактор з номінальним струмом не менше ніж 12 А, що відповідає характеристикам моделі LC1D12 ($I_n = 12$ А, категорія АС-3).

У якості об'єкта дослідження було обрано електромагнітний контактор **Schneider Electric LC1D12**. Даний апарат належить до серії Tesys D,

призначеної для керування електродвигунами та іншими навантаженнями у колах змінного струму [15].

Вибір саме цієї моделі обумовлений її широким використанням у промисловості, компактною конструкцією, а також наявністю докладної технічної документації, що дозволяє побудувати точну геометричну модель для подальшого аналізу розподілу електромагнітного поля у середовищі QuickField.



Рис. 2.1. Загальний вигляд контактора Schneider Electric LC1D12

Таблиця 2.2

Контактор LC1D12 має наступні технічні характеристики:

Номінальний струм	12 А
Кількість головних контактів	3NO
Номінальна напруга	до 690 В
Напруга керування котушки	220 В АС (50/60 Гц)
Категорія застосування	АС-3
Частота	50/60 Гц
Температурний діапазон експлуатації	-5 °С ... +60 °С

Ступінь захисту корпусу	IP20
Вага	близько 0.34 кг

Електротехнічні умови живлення та захисту контактора.

Для забезпечення нормальної та безпечної роботи електромагнітного контактора необхідно враховувати елементи захисту і способи підключення. До таких належать автоматичні вимикачі, запобіжники, болтові з'єднання, а також нагрів струмопровідних частин під час тривалої роботи.

Вибір автоматичного вимикача здійснюється відповідно до номінального струму котушки або головного кола контактора. У випадку LC1D12, автомат повинен мати номінальний струм у межах 10–16 А, з характеристикою відключення типу С або D. Запобіжники виконують додаткову функцію захисту від короткого замикання, їх номінал обирається на 10–20% вище за робочий струм котушки або навантаження.

Болтові з'єднання є критично важливими для забезпечення надійного електричного контакту в силовому колі. Вони повинні витримувати механічні навантаження та не створювати локальних перегрівів. Нагрів з'єднань і струмопровідних елементів розраховується згідно з припустимими значеннями температури нагріву – зазвичай не більше 70–85 °С при тривалому навантаженні. Зниження контактного опору досягається через правильний вибір матеріалів і зусилля затягування згідно з нормативними даними.

2.2. Розрахунок основних складових електромагнітних контакторів

Основними параметрами, що впливають на роботу контакторів, є струмовідний контур, розміри струмопровідних частин, тепловий режим та механічні характеристики контактних з'єднань.

Розрахунок основних складових електромагнітних контакторів включає визначення еквівалентного струму для роботи в номінальному режимі, підбір

оптимальних розмірів струмовідних шин, оцінку нагріву струмопровідних частин, розрахунок термічної стійкості при короткому замиканні, а також параметрів гнучких з'єднань. Окремо аналізується питання щільності струму, сили контактного натискання, а також перехідного та омичного опорів контактних з'єднань.

Комплексний підхід до розрахунку забезпечує високу надійність роботи контакторів, їхню енергоефективність і довговічність. Даний підрозділ висвітлює основні методи розрахунку та їхню практичну значущість для розробки та експлуатації електромагнітних контакторів у різних галузях промисловості та енергетики.

Розрахунок струмовідного контуру. Розрахунок струмопровідних частин контактора для роботи в номінальному режимі виконується з урахуванням тривалого еквівалентного струму [5]. Еквівалентний струм визначається як постійна величина струму, яка при тривалому протіканні через провідник забезпечує такий самий нагрів, як і реальний струм, що змінюється з часом відповідно до умов даного режиму роботи:

$$I_{\text{екв}} = I_{\text{н}} * \sqrt{\frac{\text{ПВ}\%}{100} + \frac{Z}{600} \cdot \sqrt{\frac{\text{ПВ}\%}{100}}}, \text{ А.} \quad (2.3)$$

де: ПВ% - тривалість включення;

Z – допустиме число циклів включення;

$I_{\text{н}}$ - номінальний струм головного кола, А.

$$I_{\text{екв}} = 12 * \sqrt{\frac{40}{100} + \frac{120}{600} \cdot \sqrt{\frac{40}{100}}} = \approx 8.71 \text{ А.}$$

Отже, еквівалентний струм становить 8.71 А, що буде використано у подальших розрахунках для визначення геометричних параметрів струмовідних частин.

Розрахунок розмірів струмовідних частин. Розміри шин визначаються з умови задовільного теплового режиму, як і режимі штатного навантаження, і у режимі короткого замикання.

За вибраним значенням розрахункового струму вибираємо попередні розмір мідної шини і розраховуємо коефіцієнт геометрії:

$$b = a \cdot k_r, \text{ м.} \quad (2.4)$$

$$k_r = \frac{b}{a}, \text{ м.} \quad (2.5)$$

Проводимо розрахунок розміру струмопровідної шини за формулою:

$$a = \sqrt{\frac{I^2 \cdot \rho_0 \cdot (1 + \alpha \cdot \theta_d)}{2 \cdot k_T \cdot (1 + k_r) \cdot k_r \cdot (\theta_d - \theta_o)}}, \text{ м.} \quad (2.6)$$

де: ρ_0 - питомий електричний опір матеріалу струмовідних частини апарату для мідної шини $\rho_0 = 1,68 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$;

α - температурний коефіцієнт металу контактів для міді $\alpha = 0,0043 \text{ C}^{-1}$;

θ_d - допустима температура нагріву струмопровідних частин для міді $\theta_d = 120 \text{ }^\circ\text{C}$;

θ_o - температура навколишнього середовища, $\theta_o = 40 \text{ }^\circ\text{C}$;

k_T - коефіцієнт тепловіддачі, $k_T = 10 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{C}}$;

k_r співвідношення сторін, $k_r = 2 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{C}}$;

$$a = \sqrt{\frac{8,71^2 \cdot 1,68 \cdot 10^{-8} \cdot (1 + 0,0043 \cdot 120)}{2 \cdot 10 \cdot (1 + 2) \cdot 2 \cdot (120 - 40)}} = 1,417 \cdot 10^{-5} \text{ м} \approx 0,014 \text{ мм.}$$

$$b = 0,014 \cdot 2 = 0,028 \text{ мм.}$$

Якщо умова $\alpha \leq \alpha_{\text{таб}}$ дотримується, то шина обрана правильно.

Розрахунок температури нагріву струмопровідних частин у номінальному режимі. Температуру нагрівання струмопровідних частин знаходимо з умови, що перехідний опір шинного з'єднання дорівнює нулю, тоді:

$$\theta_K = \theta_o + \frac{\rho_0 \cdot (1 + \alpha \cdot \theta_d) \cdot I^2}{k_T \cdot q \cdot p}, \text{ }^\circ\text{C.} \quad (2.7)$$

де: $p = 2 \cdot (a + b)$ і $q = a \cdot b$ - периметр і площа поперечного перерізу відповідно.

$$p = 2 \cdot (0,01417 + 0,02834) = 0,085 \text{ м.}$$

$$q = 0,01417 \cdot 0,02834 = 0,000401 \text{ м}^2.$$

$$\theta_{\text{к}} = 40 + \frac{1,68 \cdot 10^{-8} \cdot (1 + 0,0043 \cdot 120) \cdot 8,71^2}{10 \cdot 0,000401 \cdot 0,085} = 40,006 \text{ }^\circ\text{С}.$$

Умова $\theta_{\text{к}} \leq \theta_{\text{д}}$ повинна виконуватися

Температура не перевищує $\theta_{\text{д}} = 120^\circ\text{С}$, отже умова виконується.

Розрахунок термічної стійкості. При короткому замиканні в колі струмовідного контуру протікають надструми. Проте внаслідок їх короткочасної дії можна припустити значно вищі значення перевищення температури, ніж у номінальному режимі роботи. При цьому апарат повинен мати термічну стійкість. Допустиму температуру нагрівання струмопровідних частин у режимі короткого замикання прийемо рівною $\theta_{\text{кз}} = 200 \dots 250^\circ\text{С}$.

Імпульс струму дорівнює:

$$t_{\text{кз}} \cdot I_{\text{кз}}^2 = \frac{\gamma \cdot c \cdot q^2}{\rho_0 \cdot \alpha} \cdot \ln \left(\frac{1 + \alpha \cdot \theta_{\text{кз}}}{1 + \alpha \cdot \theta_{\text{к}}} \right), \text{ А}^2 \cdot \text{с}. \quad (2.8)$$

де: γ – щільність матеріалу струмопровідної шини для міді, $\gamma = 8900 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$;

c – теплоємність матеріалу струмопровідної шини для міді, $c = 390 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{С}}$;

$$t_{\text{кз}} \cdot I_{\text{кз}}^2 = \frac{8900 \cdot 390 \cdot (0,000401)^2}{1,68 \cdot 10^{-8} \cdot 0,0043} \cdot \ln \left(\frac{1 + 0,0043 \cdot 200}{1 + 0,0043 \cdot 40} \right) \approx 3,56 \cdot 10^8 \text{ А}^2 \cdot \text{с}.$$

Це значення дозволяє оцінити максимально допустиме навантаження під час короткого замикання, що витримають струмопровідні частини без втрати термічної стійкості.

Розрахунок розмірів гнучкого з'єднання. В апаратах управління, крім плоских контактних з'єднань, широко застосовуються контактні з'єднання з гнучкими зв'язками.

Ці з'єднання здійснюють струмовий зв'язок рухомого контакту апарату з струмопідвідними деталями. Гнучкі з'єднання, як правило, виконуються з еластичної мідної стрічки товщиною 0,1 мм і менше, або з багатожильного плетеного провідника, що складається з мідних жил діаметром 0,08-0,1 мм. При роботі гнучкий зв'язок не повинен мати різких перегинів.

Перетин міді гнучкого з'єднання має бути близьким до перерізу шини:

$$q_{\text{гс}} = q, \text{ м}^2. \quad (2.9)$$

Ширина шунта приблизно дорівнює ширині шини:

$$b_{\text{гс}} = b, \text{ м}. \quad (2.10)$$

Товщина гнучкого шунту:

$$a_{\text{гс}} = \frac{q_{\text{гс}}}{b_{\text{гс}}} * k_3, \text{ м}. \quad (2.11)$$

де: $k_3 = 0,785$ - коефіцієнт заповнення.

$$a_{\text{гс}} = \frac{0,000401}{0,02834} \cdot 0,785 \approx 0,0111 \text{ м} = 11,1 \text{ мм}.$$

Визначення щільності струму. Щільність струму визначається відношенням величини струму, що проходить через контактне з'єднання до повної поверхні контактування.

Для мідних шин при струмі $I = (200 \dots 2000) \text{ А}$ щільність струму дорівнює

$$j_{\text{м}} = \frac{I}{S}, \frac{\text{А}}{\text{м}^2}. \quad (2.12)$$

)

де:

J — щільність струму, $\text{А}/\text{м}^2$;

I — струм через контактне з'єднання, А ;

S — повна площа контактуючої поверхні, м^2 .

$$j_{\text{м}} = \frac{300}{0,000401} \approx 74813 \frac{\text{А}}{\text{м}^2}.$$

Розрахунок сили контактного натискання:

$$P_{\text{к}} = f_{\text{к}} \cdot S_1, \text{ Н}. \quad (2.13)$$

де: $f_{\text{к}}$ - питомий тиск в контактуючих частинах $f_{\text{к}} = 9 \frac{\text{Н}}{\text{мм}^2}$;

S_1 - площа контакту, м^2 .

$$S_1 = \frac{I}{j_{\text{м}}}, \text{ м}^2. \quad (2.14)$$

$$S_1 = \frac{300}{74813} = 0,00401 \text{ м}^2.$$

$$P_k = 9 \cdot 10^6 \cdot 0,00401 \approx 36,09 \cdot 10^3 = 36,1 \text{ кН.}$$

За величиною необхідного контактної натискання вибираємо болти М10 з певним перетином і певною силою затяжки.

При короткому замиканні кола, що містить контактні з'єднання, виникають додаткові ефекти, обумовлені появою великих механічних напруг внаслідок неоднакового температурного коефіцієнта розширення болтів і струмопровідних частин. Це призводить до того, що в болтах з'являються залишкові деформації, які при охолодженні контактної з'єднання викликають ослаблення натискання в контактах, а відтак підвищення перехідного опору і нагрівання контакту при нормальному режимі роботи.

Відстань між центрами болтів вибирається щонайменше $(2,2 \dots 2,4) \cdot d$, де d – діаметр болта, м.

Як показують досвідчені дані, перевищення температури нагріву болтів становить приблизно 25% від перевищення температури струмопровідних частин. Цю обставину необхідно враховувати при виборі зусиль натягу болтів.

Для зниження впливу залишкових деформацій рекомендується у болтових з'єднаннях використовувати пружинні шайби.

Перехідний опір контактуючих поверхонь. Цей опір утворюється за допомогою струмопровідних частин, стягнутих кількома болтами, і визначається так:

$$R_k = \frac{k_{\text{пх}} \left(1 + \frac{2}{3} \cdot \alpha \cdot \theta_d\right)}{m \cdot (0,102 \cdot P_{\text{к.табл}})^n}, \text{ Ом.} \quad (2.15)$$

де: $k_{\text{пх}}$ - коефіцієнт, що залежить від матеріалу і стану поверхні контактуючих поверхонь $k_{\text{пх}} = 2,5 \text{ Ом} \cdot \text{кг}$;

n – коефіцієнт дотику для лінійного контакту знаходиться в межах 0,5 ... 0,7, приймаємо $n=0,6$;

$m=2$ (кількість болтів).

$$R_k = \frac{2,5 \left(1 + \frac{2}{3} \cdot 0,0043 \cdot 120\right)}{2 \cdot (0,102 \cdot 36100)^{0,6}} \approx 0,0172 \text{ Ом.}$$

Омічний опір контакту. Опір $R_{к1}$ відрізняється від опору прямої ділянки контактуючих частин за рахунок викривлення ліній струму в місці контактування. Це призводить до підвищення опору контактної сполуки, яка враховується поправним коефіцієнтом k_c :

$$R_{к1} = k_c \cdot \frac{\rho_0 \cdot l}{q}, \text{ Ом.} \quad (2.16)$$

де: k_c - поправочний коефіцієнт $k_c \approx 1,3$;

l – довжина контактного з'єднання:

$$l = \frac{s_1}{b}, \text{ м.} \quad (2.17)$$

$$l = \frac{0,000401}{0,02834} = 0,1415 \text{ м.}$$

$$k_c = f\left(\frac{l}{a}\right). \quad (2.18)$$

$$k_c = 1,3 \left(\frac{0,1415}{0,01415} \right) = 13.$$

$$R_{к1} = 13 * \frac{1,68 \cdot 10^{-8} \cdot 0,1415}{0,000401} = 7,71 * 10^{-5} \text{ Ом.}$$

Повний опір контактного з'єднання:

$$R_{к0} = R_{к} + R_{к1}, \text{ Ом.} \quad (2.19)$$

$$R_{к0} = 0,0172 + 7,71 \cdot 10^{-5} = 0,0172 \text{ Ом.}$$

2.3. Розрахунок комутуючих контактів

Комутуючі контакти, як один з основних елементів струмопровідного контуру, здійснюють електричне з'єднання двох або декількох струмопроводів для переходу струму з одного струмопроводу в інший.

Конструктивна форма, розміри та параметри контактних систем, в основному, визначаються двома факторами: струмом, що протікає по контактах, та напругою мережі, при якому контакти працюють.

Контактні системи апаратів управління працюють у номінальному режимі при струмах, що досягають сотень і тисяч ампер, а короточасних режимах – десятків і сотень кілоампер. Напруга комутуваних мереж не перевищує 1140 В, а в перехідних режимах досягає кількох кіловольт.

Розрахунок перевищення температури контактного з'єднання. При нормальному режимі температура контактного з'єднання не повинна перевищувати температуру нагрівання шин, що примикають до нього, більше ніж на 10^0 C і бути більшою за допустиму.

$$\theta_{\text{к}} = \frac{I^2 \cdot R_{\text{к0}}}{k_{\text{т}} \cdot S_{\text{к}}}, \text{ } ^\circ\text{C}. \quad (2.20)$$

де: $S_{\text{к}}$ – повна зовнішня поверхня контактної з'єднання:

$$S_{\text{к}} = 2 \cdot (a + b) \cdot l, \text{ м}^2. \quad (2.21)$$

$$S_{\text{к}} = 2 \cdot (0.01415 + 0.02834) \cdot 0.1415 = 0.01201 \text{ м}^2.$$

$$\theta_{\text{к}} = \frac{12^2 \cdot 0.0172}{10 \cdot 0.01201} = 20.63 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Розрахунок значення перехідного опору. Визначення величини перехідного опору комутуючих контактів необхідне виявлення теплових втрат у контактній точці.

$$R_{\text{пх}} = \frac{k_{\text{пх}} \cdot (1 + \frac{2}{3} \cdot \alpha \cdot \theta_{\text{д}})}{m \cdot (0.102 P_{\text{к}})^n}, \text{ Ом}. \quad (2.22)$$

де: n – коефіцієнт форми контактної поверхні ($0,5 \div 0,7$) $n = 0.6$;

$$k_{\text{пх}} = 1.6 \cdot 10^{-7} \text{ Ом} \cdot \text{кг};$$

$$\alpha = 0.0043 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1};$$

$$P_{\text{к}} = 2500 \text{ Н}.$$

де: $2/3$ -коефіцієнт, що враховує зменшення температури в міру віддалення від майданчика торкання;

$k_{\text{пх}}$ - коефіцієнт, що враховує матеріал та стан контактної поверхні.

$$R_{\text{пх}} = \frac{1.6 \cdot 10^{-7} \cdot (1 + \frac{2}{3} \cdot 0.0043 \cdot 120)}{2 \cdot (0.102 \cdot 2500)^{0.6}} = 1.65 \cdot 10^{-7} \text{ Ом}.$$

Розрахунок нагріву контактів у номінальному режимі. Падіння напруги в струмовідному контурі апарату при замкнутих комутуючих контактах дорівнює:

$$U_{\text{к}} = I \cdot R_{\text{пх}}, \text{ В}. \quad (2.23)$$

$$U_{\text{к}} = 12 \cdot 1.65 \cdot 10^{-7} = 1.98 \cdot 10^{-6} \text{ В}.$$

Перевищення температури контактного майданчика розраховується за формулою:

$$t_{\text{к.пл}} = \frac{I^2 \cdot R_{\text{пк}}^2}{8 \cdot \rho_0 \cdot \lambda}, \text{ } ^\circ\text{C}. \quad (2.24)$$

де: $\rho_0 = 1.68 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$;

$\lambda = 401 \frac{\text{Вт}}{(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})}$ — для міді.

$$t_{\text{к.пл}} = \frac{12^2 \cdot (1.65 \cdot 10^{-7})^2}{8 \cdot 1.68 \cdot 10^{-8} \cdot 401} = 1.10 \cdot 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}$$

За величиною $U_{\text{к}}$ визначаємо допустиме перевищення температури. Перевищення температури допускається.

Розрахунок зносу контактів. Знос контактів відбувається як із замиканні, і при розмиканні кола струму. Мірою зносу контактів є зменшення провалу, а також обсягу і маси металу, що видаляється з контактної поверхні.

Розрахунок питомого масового зносу виконаємо за формулою:

$$G_{\text{рз}} + G_{\text{зм}} = k_{\text{нер}} * \left(k_{\text{рз}} \cdot I_{\text{от}}^2 + k_{\text{зм}} \cdot I_{\text{БК}}^2 \right) \cdot 10^{-9} \quad (2.25)$$

де: $k_{\text{нер}}$ - коефіцієнт нерівномірності $k_{\text{нер}} = 1, 1 \dots 2, 5$;

$k_{\text{рз}}, k_{\text{зм}}$ - коефіцієнти зносу $k_{\text{рз}} = k_{\text{зм}} = 0, 2 \cdot 10^{-3} \text{ кг/А}^2$;

$I_{\text{відкл}}$ - струм відключення $I_{\text{відкл}} = 6 \cdot I_{\text{н}} = 6 \cdot 12 = 72 \text{ А}$;

$I_{\text{вкл}}$ - струм включення $I_{\text{вкл}} = 2, 5 \cdot I_{\text{н}} = 2, 5 \cdot 12 = 30 \text{ А}$.

Розрахунок зношеної частини об'єму контакту

$$G_{\text{рз}} + G_{\text{зм}} = 2, 0 \cdot \left(0, 2 \cdot 10^{-3} \cdot 72^2 + 0, 2 \cdot 10^{-3} \cdot 30^2 \right) \cdot 10^{-9} = 2, 4336 \cdot 10^{-12}$$

$$V_{\text{зн}} = \frac{N}{\gamma} * \left(G_{\text{рз}} + G_{\text{зм}} \right), \text{ м}^3. \quad (2.26)$$

де: N – зносостійкість. $N = 10^6$;

γ - щільність матеріалу контакту (для міді $\gamma = 8900 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$).

$$V_{\text{зн}} = \frac{10^6}{8900} \cdot 2, 4336 \cdot 10^{-12} = 1, 1236 \cdot 10^{-10} \text{ м}^3.$$

Розрахунок лінійного зносу

$$L_{\text{зН}} = \frac{V_{\text{зН}}}{S_1}, \text{ м.} \quad (2.27)$$

$$L_{\text{зН}} = \frac{1.1236 \cdot 10^{-10}}{1 \cdot 10^{-5}} = 1.1236 \cdot 10^{-5} \text{ м.}$$

Розрахунок провалу контакту

$$\sigma_{\text{п}} = 2 \cdot L_{\text{зН}}, \text{ м.} \quad (2.28)$$

$$\sigma_{\text{п}} = 2 \cdot 1.1236 \cdot 10^{-5} = 2.2472 \cdot 10^{-5} \text{ м} = 0.0225 \text{ мм.}$$

2.4. Розрахунок параметрів короткого замикання

У режимі короткого замикання по контактах апарата протікає надструм, що тривалістю не перевищує кількох секунд, але за величиною значно перевищує номінальний. В результаті цього, в місці контактування виділяється велика кількість тепла, в десятки та сотні разів більше, ніж за тривалого режиму роботи. У точці контакту з'являються електродинамічні сили стягування, які прагнуть відкинути один контакт від іншого і тим самим зменшити контактне натискання. Крім електродинамічних сил стягування на контакти діють сили від струмовідного контуру, які також збільшують електродинамічні сили стягування. Таким чином, на місці контактування збільшується перехідний опір і розігрів, і можливе зварювання, і як наслідок – вихід апарату з ладу [4].

Основним завданням розрахунку нагріву контактів у режимі короткого замикання є визначення стійкості замкнутих контактів до струмів короткого замикання.

Розрахунок початкового струму зварювання

$$I_{\text{н.св}} = k_{\text{св}} \cdot \sqrt{P_k}, \text{ А.} \quad (2.29)$$

де: $k_{\text{св}}$ - коефіцієнт, вибирається в залежності від конструкції контактів і

форми їх поверхні $k_{\text{св}} = 100 \frac{\text{А}}{\sqrt{\text{Н}}}$.

$$P_k = 900 \text{ Н};$$

$$I_{\text{н.св}} = 100 \cdot \sqrt{900} = 300 \text{ А.}$$

Розрахунок струму приварювання

$$I_{\text{пр}} = 10 \cdot I = 10 \cdot 12 = 120 \text{ A.} \quad (2.30)$$

Розрахунок сили електродинамічного відштовхування

$$P_{\text{е.вд}} = 2 \cdot 10^{-7} \cdot I_{\text{пр}}^2 \cdot \ln \frac{S_k}{S_0}, \text{ Н.} \quad (2.31)$$

де: S_0 - переріз майданчика зминання в контактї:

$$S_0 = \frac{P_k}{\sigma_{\text{см}}}, \text{ м}^2. \quad (2.32)$$

де $\sigma_{\text{см}} = 383 \cdot 10^6 \frac{\text{Н}}{\text{м}^2}$ - межа міцності матеріалу контактів на зминання.

$$S_0 = \frac{900}{383 \cdot 10^6} = 2.35 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2.$$

$$P_{\text{е.вд}} = 2 \cdot 10^{-7} \cdot 120^2 \cdot \ln \left(\frac{1.2 \cdot 10^{-3}}{2.35 \cdot 10^{-6}} \right) = 1.796 \text{ Н.}$$

Умова $P_{\text{е.вд}} < P_k$ повинна виконуватися.

Висновки до розділу 2

У другому розділі було розглянуто ключові аспекти, пов'язані з вибором і підготовкою параметрів електромагнітного контактора для подальшого дослідження. Особливу увагу приділено вибору моделі Schneider Electric LC1D12, що відзначається компактною конструкцією, надійністю та широкою сферою застосування в промислових системах.

На основі аналізу електротехнічних умов живлення, конструктивних характеристик та умов експлуатації сформульовано обґрунтовані критерії вибору контактора. Здійснено технічний огляд параметрів, зокрема номінального струму, напруги, частоти, температурного режиму, ступеня захисту тощо. Також проведено оцінку умов захисту і правильності підключення через відповідні автоматичні вимикачі та запобіжники.

Окремо розглянуто набір технічних розрахунків, які забезпечують перевірку працездатності контактора в реальних умовах: розрахунки струмовідного контуру, температурних характеристик, перехідного та омичного опорів, сили контактного натискання і короткозамикальних режимів. Було також

виконано розрахунки, що дозволяють оцінити нагрів, знос контактів та термічну стійкість апарата.

Отримані результати створюють надійне підґрунтя для побудови точної геометричної моделі в середовищі QuickField, дозволяючи врахувати як конструктивні особливості, так і електричні параметри при подальшому чисельному моделюванні розподілу електромагнітного поля. Розділ виконує функцію аналітичної підготовки, що забезпечує правильність наступного етапу — моделювання магнітного поля та дослідження його характеристик.

РОЗДІЛ 3

МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПОЛІВ В КОТУШКАХ НИЗЬКОВОЛЬТНИХ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ КОНТАКТОРІВ

3.1 Огляд програмного забезпечення QuickField

Для чисельного моделювання розподілу електромагнітного поля в котушках низьковольтних електромагнітних контакторів у даній роботі використовується програмне середовище QuickField. Це спеціалізована система для аналізу фізичних полів методом скінченних елементів (FEM), яка дозволяє вирішувати задачі електромагнітного, теплового та механічного аналізу в двовимірній площині.

QuickField має модульну структуру, що включає:

- Model Editor – для побудови геометричної моделі;
- Problem – для задання фізичних параметрів та матеріалів;
- Field – модуль для розв’язання задачі;
- Postprocessor – для аналізу та візуалізації результатів.

Особливістю QuickField є його простий графічний інтерфейс та підтримка осьової симетрії, що є ключовим для ефективного моделювання котушок контактора. Середовище дозволяє задавати граничні умови, матеріали з нелінійною магнітною проникністю, джерела струму та інші характеристики фізичної задачі.

QuickField підтримує імпорт та експорт даних, дозволяє будувати графіки, ізолінії та векторні карти полів, що робить його ідеальним інструментом для вивчення розподілу магнітної індукції у складних електромагнітних системах, таких як контактори.

У даній роботі QuickField застосовується для моделювання магнітного поля, яке створюється котушкою контактора LC1D12, з метою дослідження

характеру розподілу поля в осерді та повітряному зазорі. Це дозволяє оцінити ефективність конструкції та вплив геометричних параметрів на параметри електромагнітної системи.

У порівнянні з іншими інженерними системами моделювання, такими як COMSOL Multiphysics, Ansys Maxwell або Elcut, QuickField має перевагу у швидкості освоєння, простоті побудови геометричних моделей та розв'язання осьовосиметричних задач. Наприклад, COMSOL Multiphysics забезпечує більшу функціональність, але вимагає значно вищих обчислювальних ресурсів та часу на підготовку моделі.

На відміну від Ansys, який орієнтований на складні тривимірні задачі з нелінійними властивостями, QuickField ідеально підходить для двовимірного аналізу електромагнітних полів, таких як моделювання котушки контактора. Це робить його ефективним і достатньо точним інструментом для даного дослідження. [6], [9]

Для моделювання електромагнітного поля в котушці контактора **LC1D12** у програмі QuickField доцільно використовувати задачу типу Magnetostatics або AC Magnetics залежно від типу збудження котушки.

У даній роботі обрана задача типу AC Magnetics, оскільки котушка контактора живиться змінним струмом частотою 50 Гц. Це дозволяє врахувати перемінність поля в часі та ефекти, пов'язані з вихровими струмами та індукцією.

Тип симетрії: осьова (2D Axisymmetric) — що дозволяє спростити геометричну модель котушки та зменшити обчислювальні витрати.

Модель розраховується для половини або чверті перерізу конструкції, що не знижує точність аналізу при наявності симетрії.

Окрім того, передбачено врахування нелінійних характеристик магнітопроводу (якщо матеріали задані відповідно до їх В-Н характеристик).

3.2 Геометричні параметри

Модель для симуляції в QuickField будується на основі поперечного перерізу котушки контактора. Геометричні розміри беруться з технічної документації або орієнтовно вимірюються з креслень чи розбірного зразка.

Для моделі обрано такі геометричні параметри:

- діаметр сердечника: 40 мм;
- внутрішній діаметр котушки: 50 мм;
- зовнішній діаметр котушки: 100 мм;
- висота котушки (вздовж осі): 120 мм.
- товщина кожного шару обмотки: 0.8 мм (для дроту діаметром 0.63 мм з урахуванням ізоляції)
- ширина повітряного зазору: 1.0 мм

Вказані розміри дозволяють побудувати точну двовимірну модель у середовищі QuickField для подальшого аналізу розподілу електромагнітного поля. Усі розміри вводяться у міліметрах, а при побудові геометрії потрібно дотримуватись масштабу та узгодженості координат у системі побудови.

3.3 Електричні параметри

Для забезпечення точності моделювання у середовищі QuickField необхідно ввести повний набір електричних параметрів, які описують умови збудження котушки та характеристики струмопровідних матеріалів.

Ключові параметри:

- кількість витків котушки: 120;
- струм у котушці (розрахунковий): 0.25 А;
- напруга живлення: 220 В;
- частота: 50 Гц;
- активний опір котушки: 880 Ом.

Матеріали провідника та магнітопроводу:

- питомий опір міді: $\rho = 1,72 \times 10^{-8}$ Ом·м;
- питомий опір сталі: $\rho = 1.5 \times 10^{-7}$ Ом·м;
- температурний коефіцієнт опору міді: $\alpha = 0.0043$ 1/°С.

Для зміни струму через котушку в параметрах моделі можна використовувати значення сили струму або задавати напругу і опір. У нашому випадку обрано фіксований струм для стабільності магнітного поля при моделюванні.

3.4 Магнітні властивості матеріалів

Магнітні властивості матеріалів відіграють ключову роль у розрахунках електромагнітного поля, оскільки визначають поведінку магнітного потоку в магнітопроводі та повітрі.

Основні параметри для моделювання:

- магнітна проникність сталі (нелінійна залежність b-h): початкове значення $\mu \approx 4000$;
- магнітна проникність повітря: $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ Гн/м;

– наявність гістерезису в сталевих частинах: не враховується (лінійна апроксимація);

– насичення магнітопроводу: критичне значення $B \approx 1.6$ Тл.

У програмі QuickField матеріали задаються через довідник або вручну у вигляді таблиці значень $B(H)$. Для спрощеного аналізу в даній роботі використовується лінійна модель сталі з постійною магнітною проникністю. При необхідності можна використати експериментальні або довідкові дані щодо $B-H$ характеристики для сталі типу 10ПС, 08Ю, тощо.

Коректне задання властивостей дозволяє отримати адекватні результати розподілу магнітної індукції, щільності потоків і зони насичення у сердечнику.

3.5 Граничні умови

Граничні умови в задачах магнітного поля визначають поведінку векторів магнітної індукції та напруженості на межі області моделювання. Вони суттєво впливають на точність розрахунку й відображають фізичні умови за межами моделі.

У моделюванні котушки електромагнітного контактора використовуються такі типи граничних умов.

На зовнішніх межах моделі встановлюється умова типу Magnetic Insulation (ізоляція магнітного потоку), що означає відсутність проникнення потоку через границю. Для осі симетрії (у випадку осьової симетрії) задається умова Symmetry — магнітний потік спрямований паралельно осі, а нормальна складова поля дорівнює нулю. У випадку моделювання повітряного зазору або межі між матеріалами (мідь-сталь, повітря-сталь) забезпечується безперервність компонент магнітного поля згідно з законами Максвелла.

Правильне задання граничних умов дозволяє уникнути хибних результатів, зокрема неправильного розподілу магнітного поля або появи штучних джерел поля на межі моделі.

3.6 Мережа скінченних елементів

Розбиття моделі на скінченні елементи (finite element mesh) є критичним етапом для точного аналізу електромагнітного поля в середовищі QuickField. Якість сітки напряму впливає на точність розрахунку, особливо у зонах з високими градієнтами магнітної індукції, таких як повітряний зазор чи кути магнітопроводу.

Для побудови сітки застосовуються такі принципи:

– у зонах повітряного зазору та навколо сердечника використовується згущення елементів — розмір елемента не перевищує 1 мм.

– у однорідних областях (наприклад, усередині сердечника або котушки) застосовується грубіша сітка — до 5 мм.

– у місцях з різким перепадом матеріалів (між повітрям і сталлю, між міддю і повітрям) використовується локальна адаптація сітки.

Програма QuickField автоматично формує сітку, однак передбачено ручне коригування розмірів елементів та розміщення вузлів. Загальна кількість елементів має бути достатньою для забезпечення точності, але не надмірною, щоб уникнути надлишкових обчислювальних витрат.

Після побудови сітки обов'язково виконується її перевірка — відсутність надтонких, витягнутих чи перекручених трикутників. Якісна сітка забезпечує достовірний розподіл напруженості та магнітної індукції в усіх областях моделі.

3.7 Аналіз геометрії та параметрів котушки

Котушка електромагнітного контактора є одним із ключових елементів, який формує магнітне поле для приведення в дію якірної системи. Основними параметрами, що впливають на розподіл електромагнітного поля, є кількість витків, геометричні розміри, матеріал провідника, тип струму (постійний або

змінний), наявність повітряних зазорів, форма осердя та режим роботи котушки.

У даній роботі використано котушку, встановлену в контакторі Schneider Electric LC1D12. Основні геометричні характеристики котушки:

- внутрішній діаметр обмотки: 50 мм;
- зовнішній діаметр обмотки: 100 мм;
- висота обмотки: 120 мм;
- діаметр провідника: 0.63 мм;
- товщина ізоляції: 0.17 мм;
- кількість витків: 120.

Матеріалом обмотки є мідь з питомим опором 1.68×10^{-8} Ом·м, що забезпечує хорошу провідність. Сердечник виготовлений зі сталі з магнітною проникністю близько 4000. Зазор між якорем і сердечником становить близько 1 мм, що створює характерну область високої концентрації магнітного поля.

Аналіз геометрії проводився для виявлення потенційних областей насичення, втрат на вихрові струми, а також для оптимізації сітки при моделюванні. Правильне врахування форми котушки та її просторового розміщення є важливим етапом у побудові моделі в QuickField. Модель має відображати реальну структуру з урахуванням векторів напрямку струму та взаємодії магнітних потоків.

Таким чином, точне геометричне та електричне описання котушки дозволяє отримати достовірні результати при моделюванні та аналізі електромагнітних процесів.

3.9 Порядок моделювання розподілу магнітного поля в котушці електромагнітного контактора у середовищі QuickField

Загальні налаштування задачі

–тип задачі: **Magnetostatics** – обирається тому, що ми досліджуємо стаціонарне магнітне поле, створене постійним струмом у котушці контактора;

– одиниці довжини: **Millimeters** – оскільки розміри елементів (осердя, зазор, котушка) невеликі, доцільно використовувати міліметри для точності введення;

– клас моделі: **Plane-parallel** – означає, що моделювання проводиться у 2D-площині, де геометрія є симетричною по третій осі (наприклад, глибина не змінюється);

– система координат: **Cartesian** – вибір декартової системи координат зручний для прямокутної та лінійної структури елементів (як у моделі контактора).

Побудова геометрії моделі

- Створено прямокутну область повітряного середовища;
- Зліва внизу створено три елементи:
 - Нижня частина осердя (якір);
 - Повітряний зазор;
 - Верхня частина осердя;
- Справа від зазору розміщена котушка.

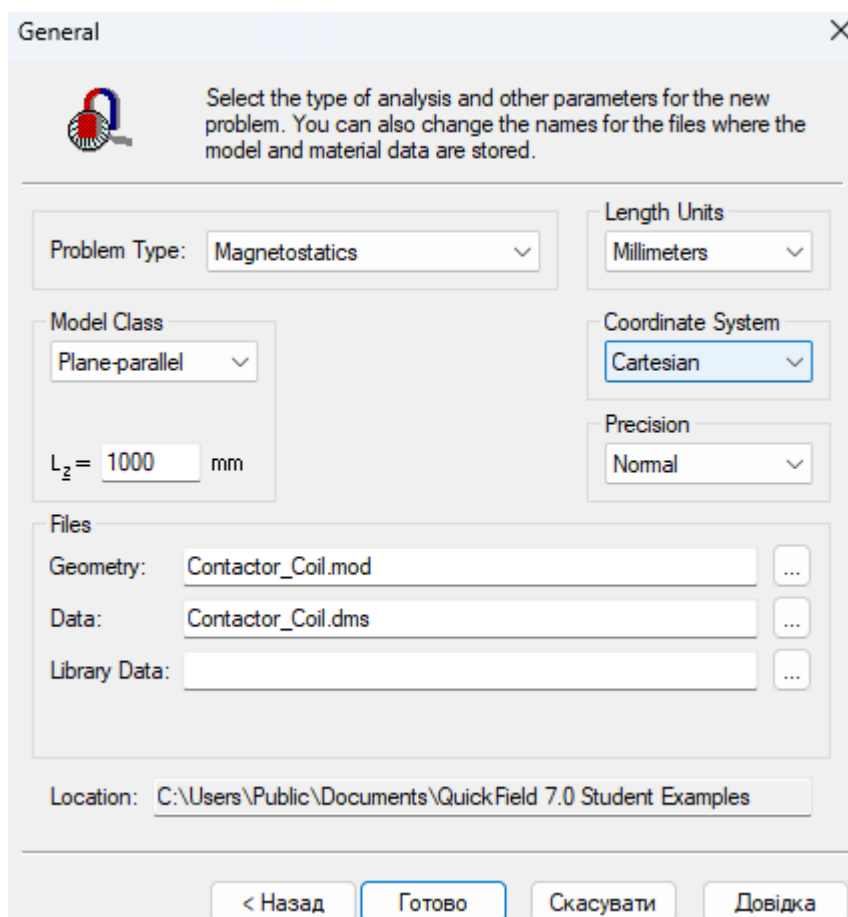


Рис. 3.1. Загальні налаштування задачі

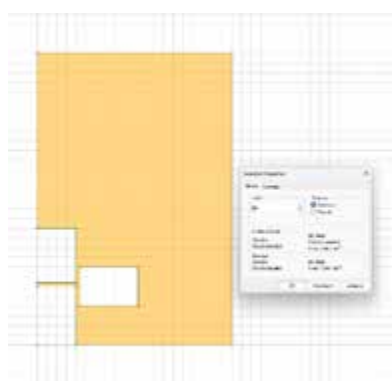


Рис. 3.2. Повітряне середовище (Air)



Рис. 3.3. Котушка контактора (Coil)



Рис. 3.4. Нижня та верхня частина осердя (steel) (між ними зазор)

Параметри матеріалів

– **Air**: $\mu_x = 1$ (Relative), без джерел;

– **Steel**: $\mu_x = 5000$ (Relative), без джерел;

– **Coil**: $\mu_x = 1$; Field Source: Total Ampere-Turns.

– $I = 300$ A; Це джерело магнітного поля. Значення вибрано як умовне (або розраховане), що відповідає силі струму, помноженій на кількість витків.

– **Conductor's Connection**: In Parallel Вказує, що провідники в обмотці з'єднані паралельно — важливо для точного розподілу струму в симуляції.



Рис. 3.5. Повітряне середовище (Air)



Рис. 3.6. Котушка контактора (Coil)



Рис. 3.7. Нижня та верхня частина осердя (Steel) (між ними зазор)

Задання граничних умов (Edge Labels)

- Вибрані зовнішні краї повітряної області
- Label = Boundary
- Magnetic Potential $A = A_0 = 0$ Вб/м (або Zero potential)

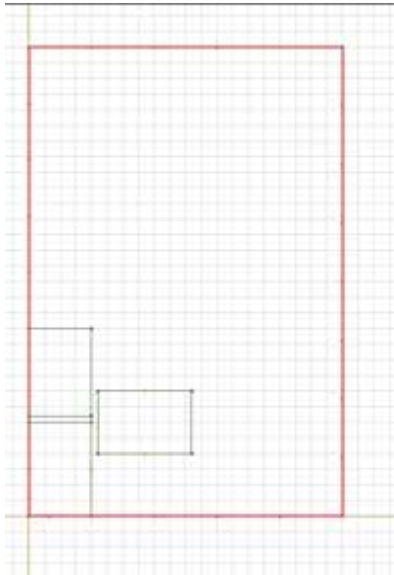


Рис. 3.8. Вибрані зовнішні краї повітряної області

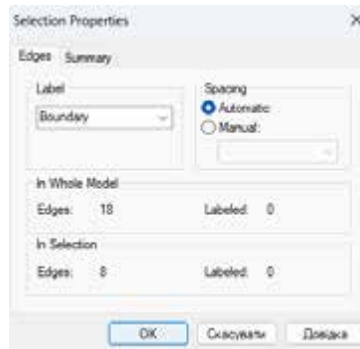


Рис. 3.9. Присвоєне ім'я Boundary вибраним об'єктам

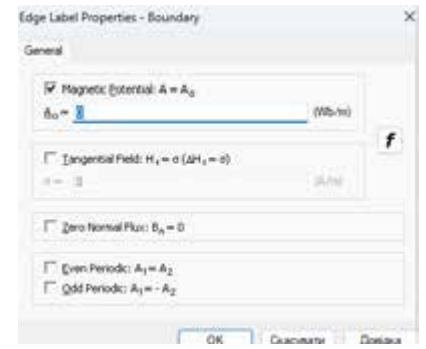


Рис. 3.10. Контур повітряного середовища з магнітним потенціалом $A=A_0=0$, граничних умов.

Сітка скінченних елементів (Mesh)

Для області *air* обрано **Spacing: Manual = 20**, а для областей *Coil* і *Steel* **Manual = 5** (щоб уникнути перевищення ліміту 255 вузлів)

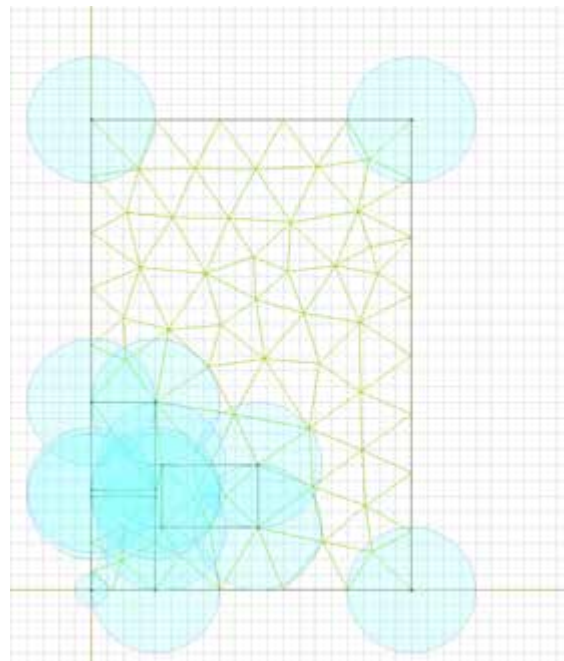


Рис. 3.11 Сітка скінченних елементів (Mesh)

Розв'язання задачі та перегляд результатів

- у меню **Problem** обрано пункт **Solve**;
- відображено карту розподілу **магнітної індукції B**;
- увімкнено поле напрямків (вектори);
- показані лінії поля (ізолінії);
- отримані значення B , H , A , W , μ .

Висновки до розділу 3

У третьому розділі було виконано побудову та налаштування моделі розподілу магнітного поля в електромагнітному контакторі з використанням програмного середовища QuickField. Було визначено тип задачі — магнітостатична, побудовано геометричну модель котушки та осердя, а також присвоєно відповідні мітки для кожної області.

В межах роботи виконано точне задання електричних та магнітних параметрів матеріалів, що беруть участь у процесі: повітря, сталеве осердя та провідна котушка. Обрано граничні умови, що забезпечують фізично коректне розв'язання задачі. Важливою частиною підготовки була оптимізація структури сітки скінченних елементів, що дозволило забезпечити достатню точність при обмеженнях студентської версії програмного забезпечення.

Таким чином, створена модель є коректною, фізично обґрунтованою і дозволяє наочно дослідити основні закономірності розподілу електромагнітного поля в конструкції низьковольтного контактора

РОЗДІЛ 4.

ДОСЛІДЖЕННЯ ОСОБЛИВОСТЕЙ РОЗПОДІЛУ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ПОЛЯ В КОТУШКАХ НИЗЬКОВОЛЬТНИХ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ КОНТАКТОРІВ

4.1 Розподіл магнітного векторного потенціалу A (Вб/м)

На рис. 4.1 представлено картограму розподілу магнітного векторного потенціалу A в області котушки низьковольтного електромагнітного контактора. Графічне представлення виконано у вигляді ізоліній та заливки кольором. Максимальне значення потенціалу досягає 1.480×10^{-4} Вб/м, що спостерігається у центральній частині котушки — зоні найбільшої концентрації магнітного потоку.

Структура ізоліній A відповідає формі силових ліній магнітного поля: вони утворюють замкнені контури, найщільніше скупчені в активній області котушки. Зменшення A від центру назовні вказує на розсіювання поля.

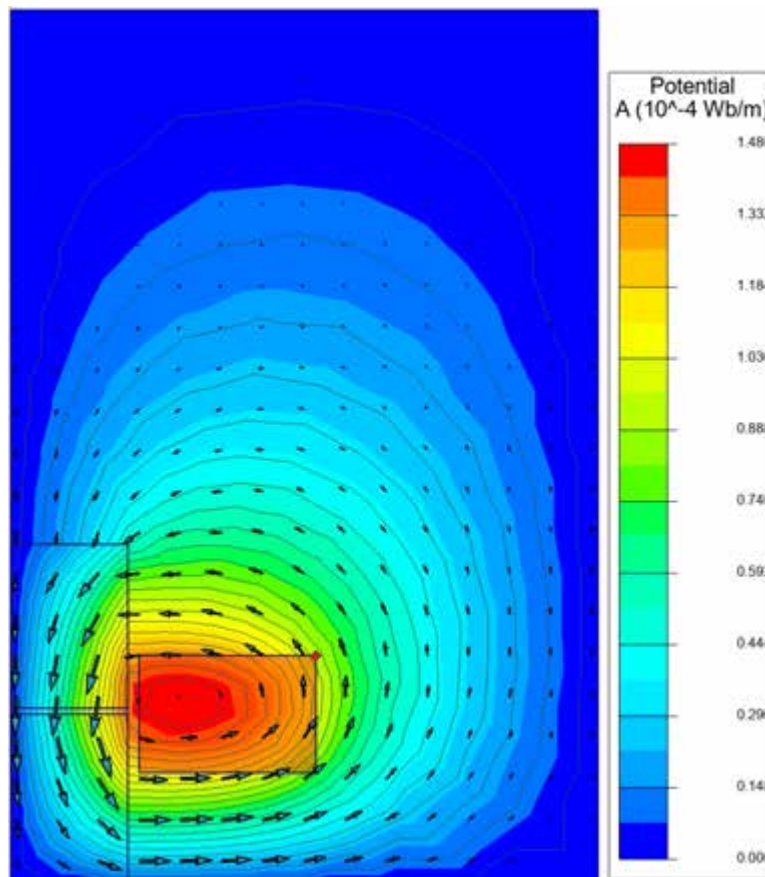


Рис 4.1. Карта розподілу магнітного векторного потенціалу A у площині котушки контактора

На рис.4.2 наведено графік розподілу величини A вздовж обраної лінії, що проходить через тіло котушки. Саме ця ділянка є основною зоною збудження магнітного поля в моделі. Крива демонструє поступове зростання A до локального максимуму, що відповідає серцевині котушки, після чого спостерігається спад — у повітряних та периферійних ділянках.

Максимальне значення на графіку підтверджує результати карти – близько 1.43×10^{-4} Вб/м, що відповідає центрованому магнітному збудженню. Також видно нерівномірність, що пояснюється геометричними особливостями осердя або неоднорідністю середовища.

Координата L , мм, що використовується по осі X у графіках, визначається як накопичена довжина вздовж обраної лінії в моделі, яка проходить через точки з координатами x та y . Значення L обчислюється як геометрична відстань між суміжними точками цієї лінії відповідно до виразу:

$$L = \sum \sqrt{(x_i - x_{i-1})^2 + (y_i - y_{i-1})^2} \quad (4.1)$$

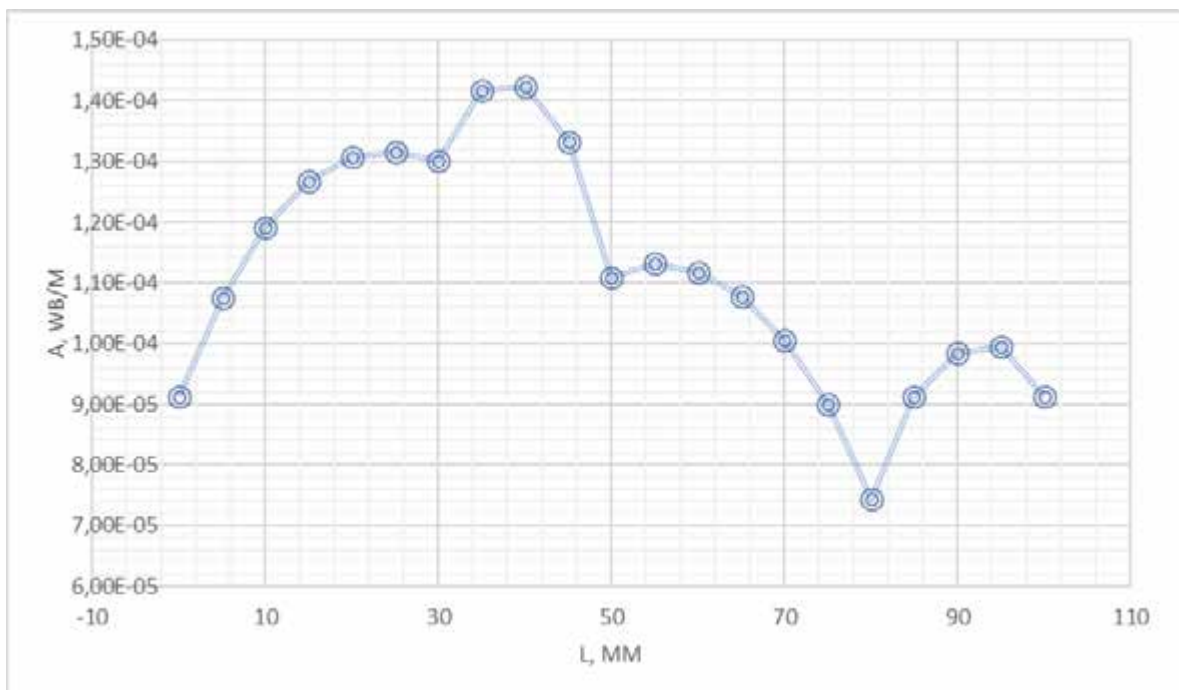


Рис. 4.2. Графік розподілу магнітного векторного потенціалу A вздовж тіла котушки

Для кількісної оцінки розподілу векторного потенціалу A в тілі котушки було побудовано таблицю значень уздовж довжини L , мм. Як видно з табличних даних, величина A зростає від периферії до центральної частини, де досягає максимального значення близько 1.42×10^{-4} Вб/м. Далі спостерігається поступове зниження, що узгоджується з характером поля в симетричній котушці.

Таблиця 4.1

Розподіл магнітного векторного потенціалу A вздовж довжини котушки

L , мм	0	5	10	15	20	25	30
$A, \frac{\text{Вб}}{\text{м}} \cdot 10^{-3}$	0,0914	0,1076	0,1192	0,1267	0,1307	0,1316	0,1301
L , мм	0	5	10	15	20	25	30
$A, \frac{\text{Вб}}{\text{м}} \cdot 10^{-3}$	0,1417	0,1424	0,1332	0,1108	0,1131	0,1118	0,1077
L , мм	0	5	10	15	20	25	30
$A, \frac{\text{Вб}}{\text{м}} \cdot 10^{-3}$	0,1005	0,0901	0,0743	0,0913	0,0984	0,0995	0,0914

4.2 Розподіл магнітної індукції B (Тл)

На рис.4.3 представлено картограму розподілу магнітної індукції B у моделі котушки електромагнітного контактора. Значення наведено у мілітеслах ($\times 10^{-3}$ Тл). Максимальна індукція досягає приблизно 8.59 мТл, що спостерігається у зоні магнітопроводу та поблизу повітряного зазору. Найбільша густина потоку характерна для ділянок із високою магнітною проникністю (наприклад, сталеві деталі), тоді як у повітрі індукція зменшується, що видно за синьою областю в центрі моделі.

Контури ізоліній свідчать про напрям і інтенсивність потоку. Найщільніша концентрація силових ліній спостерігається в області дії магнітного поля поблизу зазору, що важливо для забезпечення сили притягання.

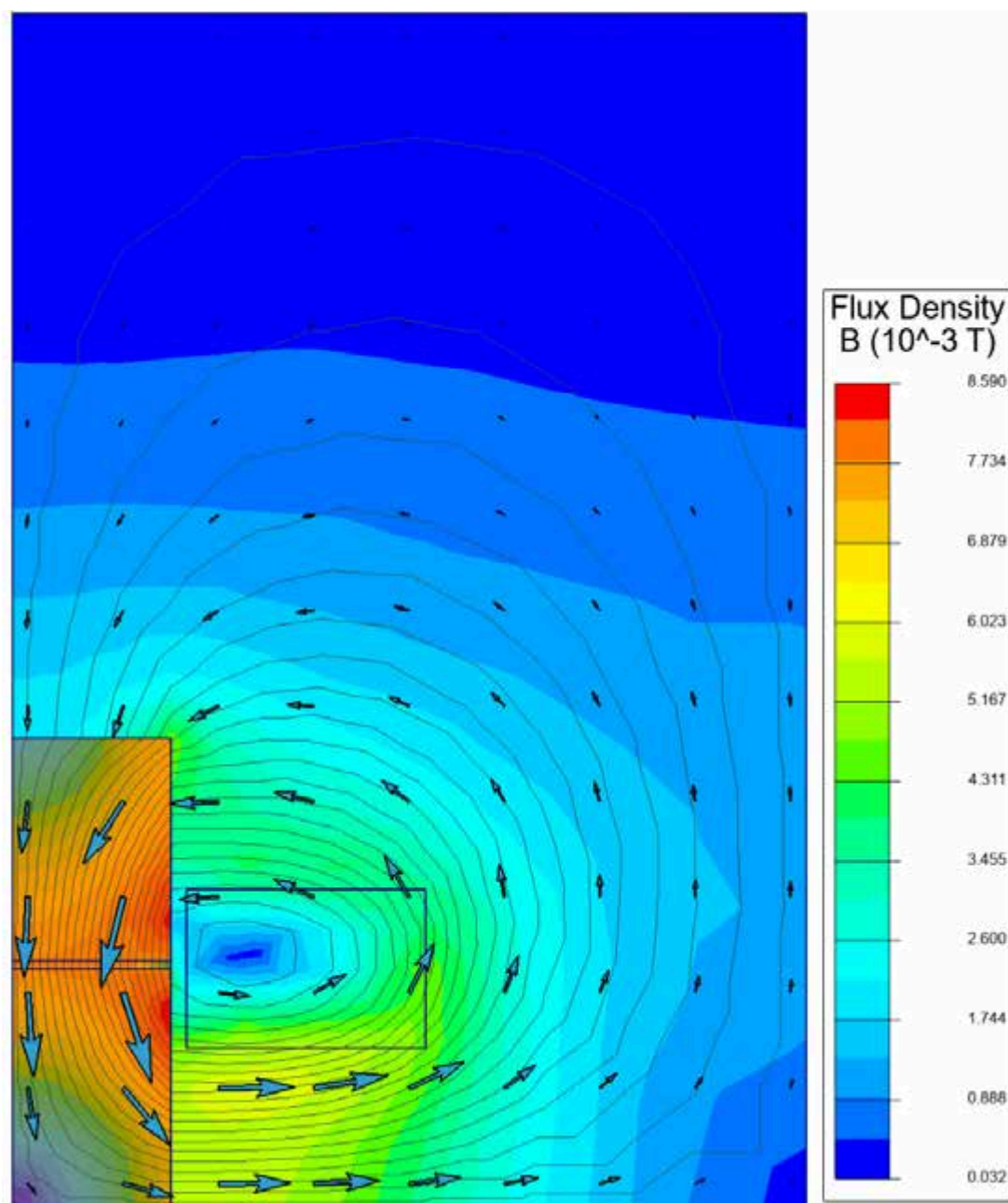


Рис. 4.3. Карта розподілу магнітної індукції B у площині моделі

На рис.4.4 представлено графік розподілу величини B вздовж лінії, яка проходить через області повітряного зазору та контактів. Саме ці зони є ключовими з точки зору ефективності передавання магнітного потоку та створення зусилля притягання.

Графік демонструє кілька локальних максимумів, що відповідають зонам з високою концентрацією магнітного потоку. Найбільше значення становить близько 6.97 мТл, що узгоджується з ізолініями на попередньому рис.. Спади до 0.0026 Тл відповідають ділянкам з низькою проникністю — повітряним зазорам. Це вказує на втрати потоку через розсіювання.

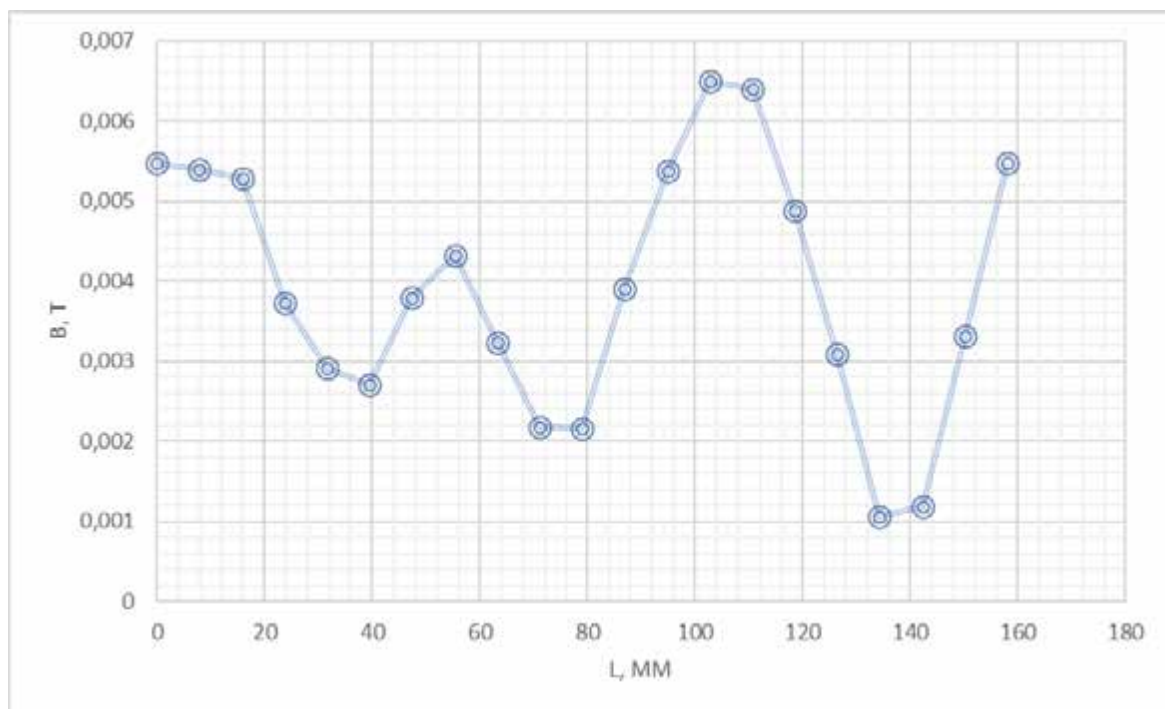


Рис. 4.4. Графік розподілу магнітної індукції В уздовж повітряного зазору та контактів

Додатково проведено кількісний аналіз розподілу магнітної індукції В вздовж траєкторії, що проходить через повітряний зазор і магнітні контакти. Результати наведено в таблиці 4.2. Як видно з даних, індукція змінюється в межах від 0.0010597 Тл до 0.0064985 Тл, досягаючи пікових значень у центральній частині та на межах контакту повітря–осердя. Це підтверджує ефективну концентрацію магнітного потоку в області дії електромагніта.

Профіль розподілу В відображає характерну зміну щільності магнітного потоку при проходженні крізь середовища з різною магнітною проникністю.

Найнижчі значення спостерігаються у повітряному зазорі, тоді як найбільші – в контактах і осерді.

Таблиця 4.2

Розподіл магнітної індукції В уздовж повітряного зазору та контактів

L, мм	0	7,9	15,8	23,7	31,6	39,5	47,4
B, мТл	5,477	5,404	5,288	3,726	2,909	2,713	3,790
L, мм	55,3	63,2	71,1	79	86,9	94,8	102,7
B, мТл	4,326	3,231	2,181	2,156	3,911	5,387	6,498
L, мм	110,6	118,5	126,4	134,3	142,2	150,1	158
B, мТл	6,410	4,892	3,091	1,060	1,187	3,322	5,477

4.3 Розподіл напруженості магнітного поля Н (А/м)

На рисунку 4.5 наведено картограму напруженості магнітного поля Н у площині моделі електромагнітного контактора. Найбільші значення досягають понад 5500 А/м, і спостерігаються у зоні повітряного зазору, де відсутнє посилення за рахунок магнітної проникності матеріалу. Це відповідає фізичній природі Н як збуджувальної величини, що не залежить від магнітних властивостей середовища.

Ізолінії Н щільно концентруються в зазорі між якорем і осердям, що свідчить про інтенсивний потік енергії та силу дії на рухомі частини конструкції. Напруженість у тілі осердя, навпаки, значно менша.

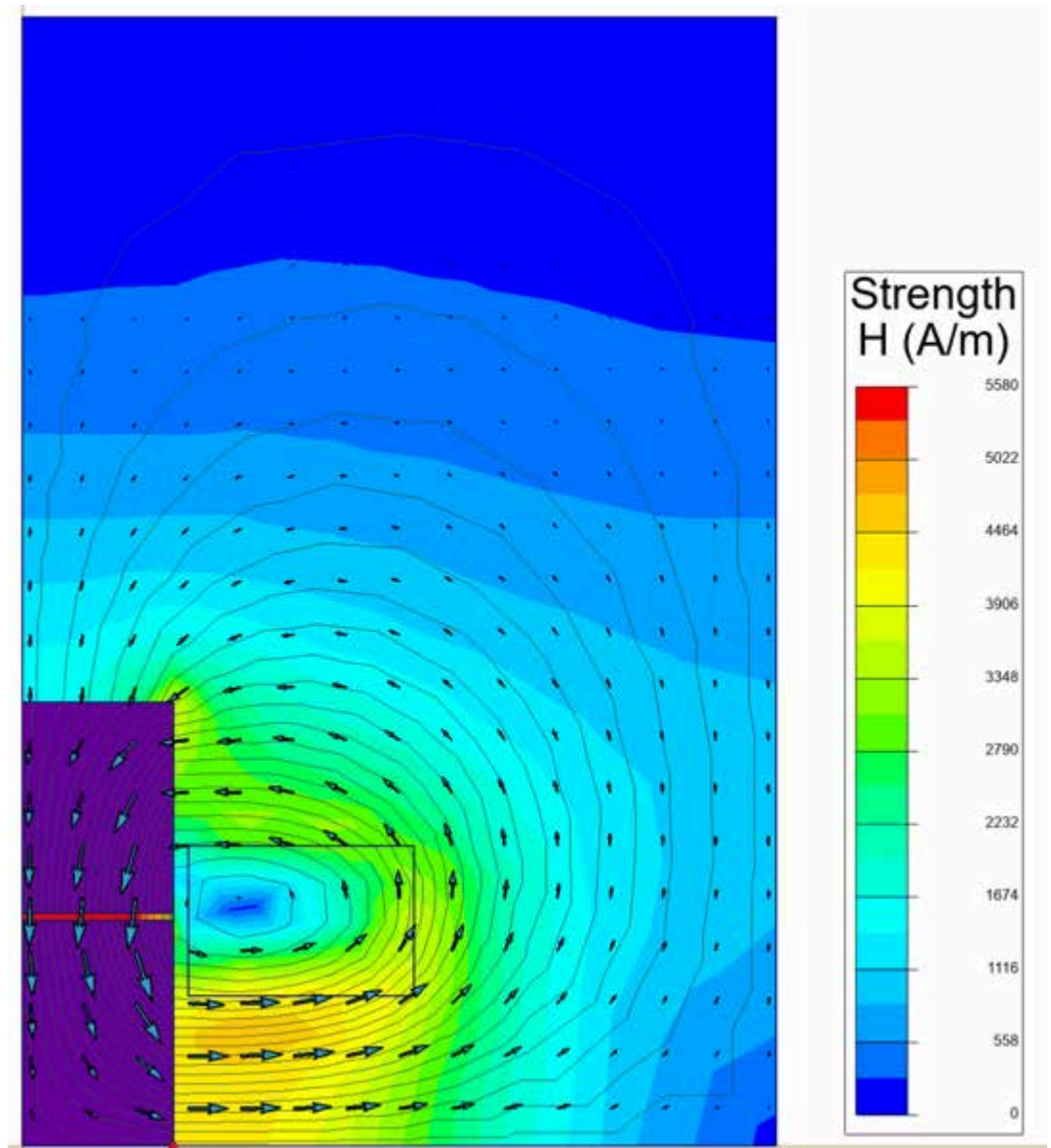


Рис. 4.5 Карта розподілу напруженості магнітного поля H у площині котушки контактора

На рис. 4.6 представлено графік зміни H уздовж лінії, що проходить через повітряний зазор та контактну частину магнітопроводу. На початку графіка значення H сягає 4358 А/м, після чого спостерігається спад у міру віддалення від джерела струму. У центральній частині ($L \approx 70\text{--}158$ мм) значення H зменшується до $\approx 0.1\text{--}1$ А/м, що вказує на вихід за межі основної активної області поля.

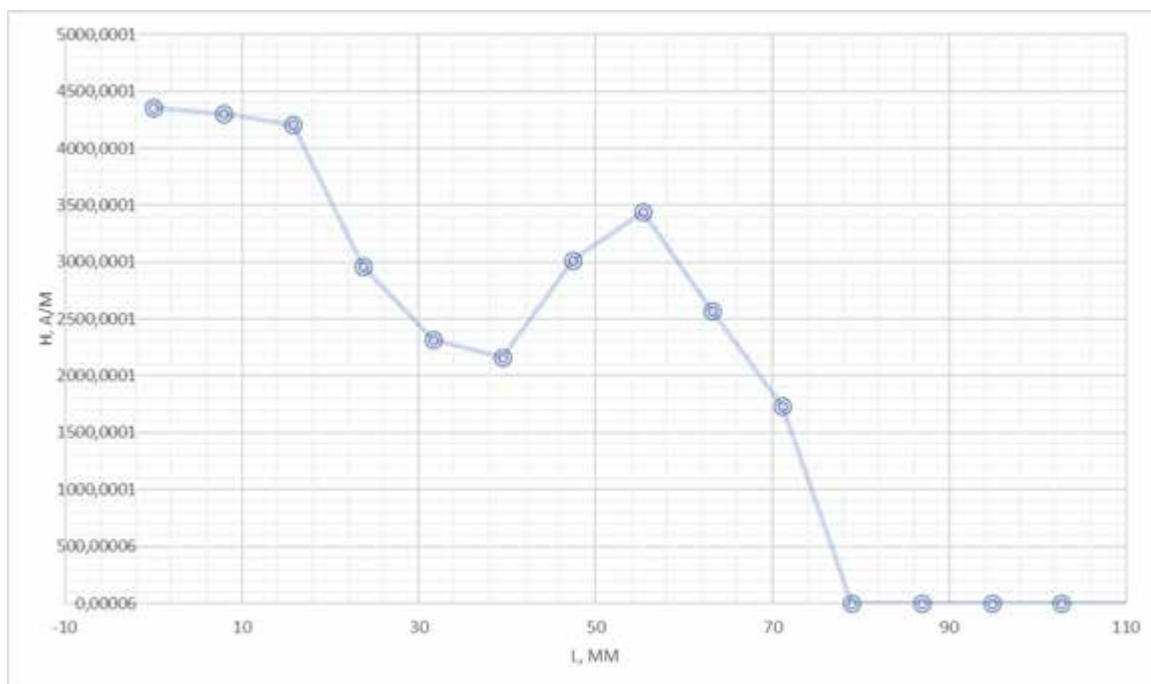


Рис. 4.6. Графік розподілу напруженості H уздовж повітряного зазору та контактів

Для деталізації результатів подано табл. 4.3 значень напруженості H залежно від координати L .

Таблиця 4.3

Розподіл напруженості магнітного поля H уздовж повітряного зазору та контактної області

L, мм	0	7,9	15,8	23,7	31,6	39,5	47,4
H, A/м	4358,53	4300,24	4208,43	2965,43	2315,02	2158,69	3016,03
L, мм	55,3	63,2	71,1	79	86,9	94,8	102,7
H, A/м	3442,27	2571,03	1735,77	0,343113	0,622441	0,857434	1,03427
L, мм	110,6	118,5	126,4	134,3	142,2	150,1	158
H, A/м	1,02018	0,778654	0,492	0,168657	0,188902	0,528651	0,871707

4.4 Розподіл об'ємної густини магнітної енергії w (J/m^3)

На рис.4.7 подано карту розподілу густини магнітної енергії w в об'ємі моделі електромагнітного контактора. Найвищі значення досягають $\approx 19.6 J/m^3$ у зоні повітряного зазору поблизу активної частини котушки. Це свідчить про концентрацію магнітної енергії саме в робочій ділянці, де формується сила притягання. Розподіл побудований відповідно до класичної формули:

$$w = \frac{2}{1} B \cdot H. \quad (4.2)$$

Рівномірність поля в осерді забезпечує його ефективне використання, тоді як у повітрі, попри нижчу магнітну проникність, спостерігається значний вклад у енергію поля через високі значення H .

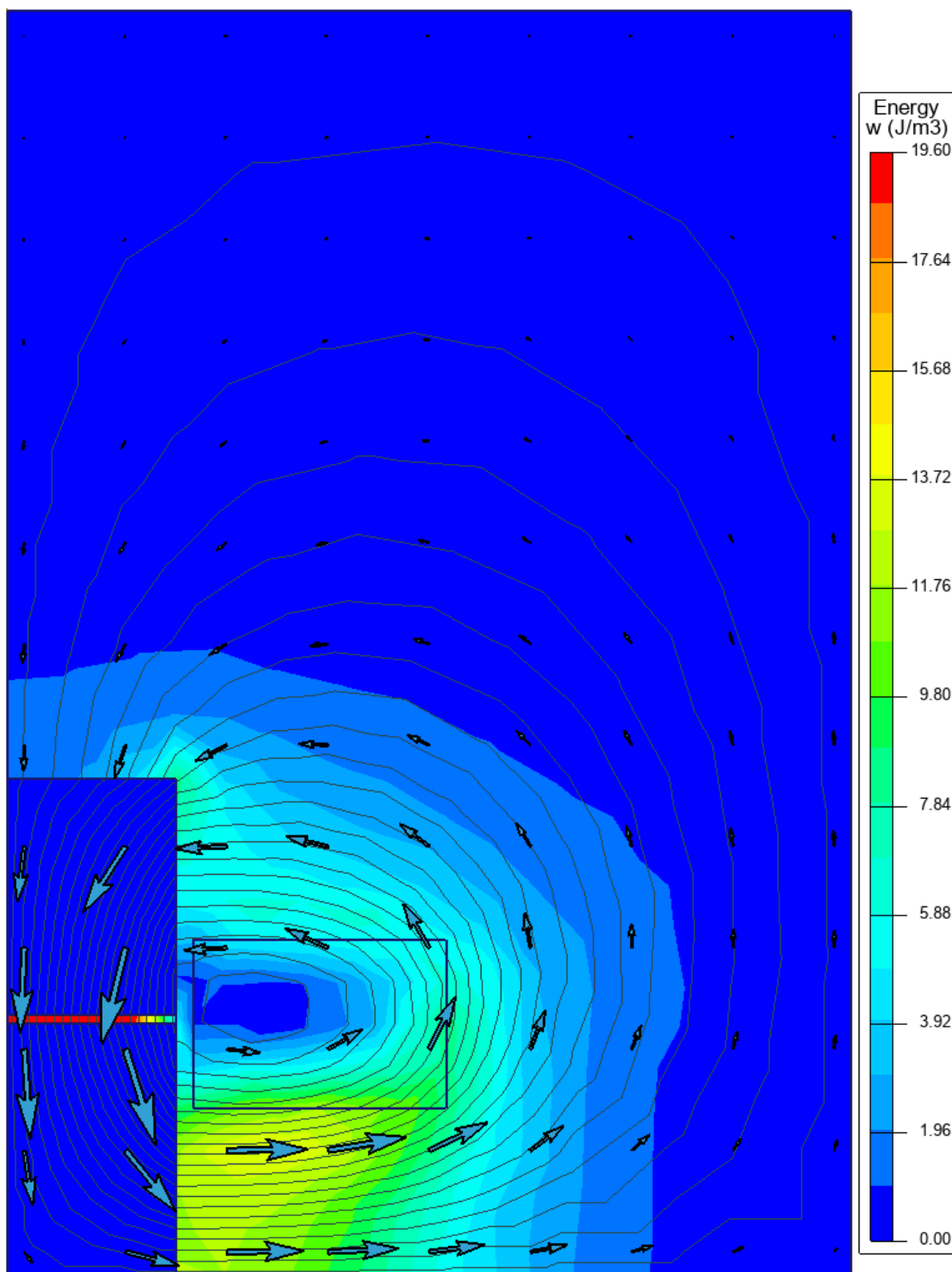


Рис 4.7. Карта розподілу об'ємної густини магнітної енергії w у моделі котушки

На рис.4.8 представлено графік розподілу величини w уздовж довжини L , мм — від котушки через зазор до контактів. Значення зменшується від 11.9 J/m^3 до майже нульових, що свідчить про поступовий спад енергії в напрямку до периферії. Піки на графіку відповідають зонам, де значення B і H є одночасно високими.

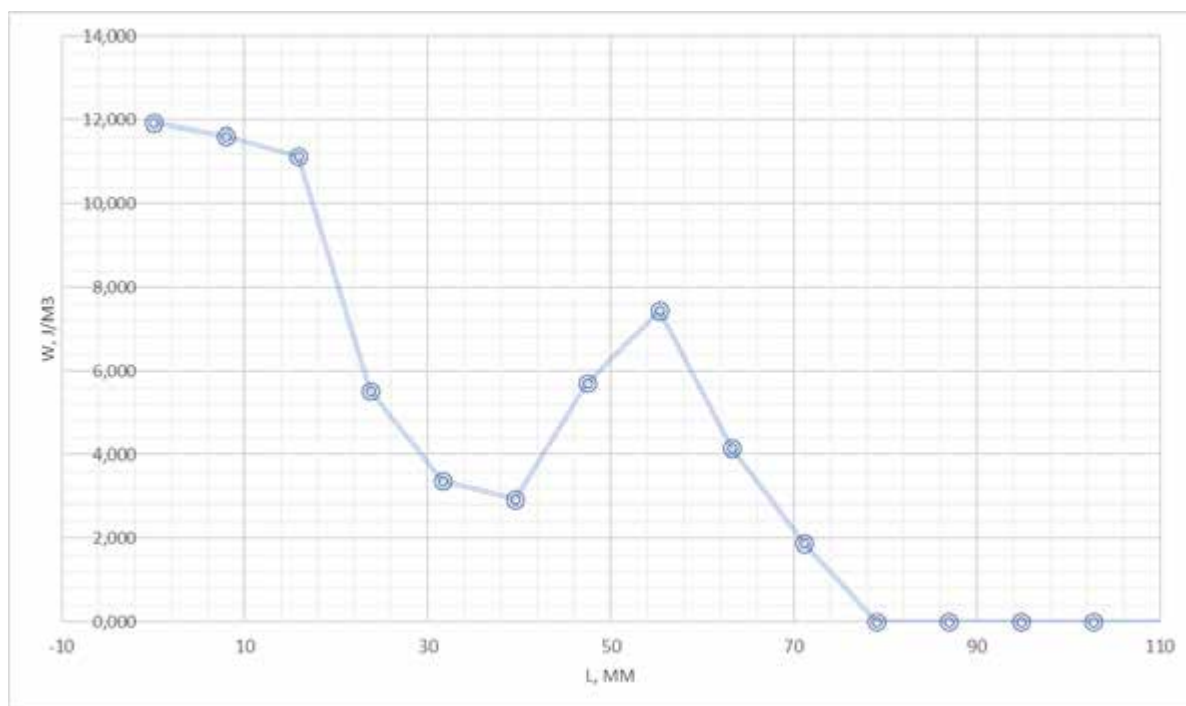


Рис 4.8. Графік розподілу густини енергії w вздовж повітряного зазору і контактної частини

Таблиця 4.4

Значення густини магнітної енергії w залежно від координати L

L, мм	0	7,9	15,8	23,7	31,6	39,5	47,4
$w, \frac{J}{m^3} \cdot 10^3$	11936	11618,9	11128,1	5525,31	3367,36	2927,93	5715,44
L, мм	55,3	63,2	71,1	79	86,9	94,8	102,7
$w, \frac{J}{m^3} \cdot 10^3$	7445,1	4153,29	1893,06	0,369848	1,21715	2,30968	3,36059
L, мм	110,6	118,5	126,4	134,3	142,2	150,1	158

$w, \frac{J}{m^3} \cdot 10^3$	3,269 7	1,90475	0,760465	0,089363	0,112104	0,877986	2,38721
-------------------------------	------------	---------	----------	----------	----------	----------	---------

Максимальні значення густини енергії спостерігаються поблизу активної частини котушки та в зоні повітряного зазору — саме там, де створюється зусилля притягання в електромагнітному контакторі. Це підтверджує ефективну локалізацію поля та коректну роботу магнітної системи.

4.5 Аналіз похибок та достовірності результатів моделювання

При проведенні чисельного моделювання розподілу електромагнітного поля в котушці електромагнітного контактора важливим є не лише отримання результатів, а й оцінка їхньої достовірності та виявлення потенційних джерел похибок. У даній роботі моделювання виконувалося за допомогою середовища QuickField, яке реалізує метод скінченних елементів. Якість отриманих результатів безпосередньо залежить від точності геометричної моделі, параметрів сітки, вибору матеріалів та граничних умов.

Одним із джерел похибки є спрощення геометрії моделі. У процесі побудови була виключена низка другорядних конструктивних елементів, таких як фаски, кріпильні отвори або місцеві нерівності поверхні. Це може спричинити відхилення розподілу поля в окремих зонах, однак не впливає суттєво на загальний характер електромагнітних процесів.

Ще одним фактором є ідеалізація фізичних властивостей матеріалів. У розрахунках застосовувалися усереднені значення магнітної проникності для сталі, а також нехтувалися нелінійні явища, такі як насичення та гістерезис. У дійсності ж магнітна проникність залежить від індукції і може змінюватися на декілька порядків у зоні насичення, що не враховано в лінійній моделі.

Значний вплив на точність результатів має також вибір параметрів сітки. При надто великому кроці елемента виникає ризик недооцінки локальних максимумів і викривлення розподілу, особливо у вузьких ділянках, таких як повітряний зазор. У даному дослідженні застосовано адаптивну сітку з

локальним згущенням у критичних зонах, що дозволяє забезпечити баланс між обчислювальною складністю та точністю.

Граничні умови також впливають на загальний характер поля. У роботі було використано умовну віддалену межу з нульовим нормальним потоком (Neumann boundary), що є стандартною практикою. Однак занадто близьке розміщення цієї межі може викликати відображення поля та спотворення результатів. У моделі межі були винесені на достатню відстань від активної частини, що дозволило уникнути цього ефекту.

Для підтвердження достовірності моделі було здійснено порівняння чисельних результатів з аналітичними оцінками. Теоретичне значення магнітної індукції у центрі котушки можна обчислити за формулою для ідеального соленоїда:

$$B = \mu_0 * \frac{N \cdot I}{l}, \text{ Тл.} \quad (4.3)$$

де $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м — магнітна стала;

$N=1300$ — кількість витків;

$I=0,25$ А — струм у котушці;

$l=0,1$ м — довжина котушки.

Підставивши значення, отримаємо:

$$B = 4\pi \cdot 10^{-7} * \frac{1300 \cdot 0,25}{0,1} \approx 4,09 \cdot 10^{-3} \text{ Тл.}$$

Таким чином, теоретичне значення становить приблизно 4,09 мТл. За результатами чисельного моделювання у центрі зазору було отримано значення магнітної індукції $B_{\text{мод}} = 4,3$ мТл, що дає відносну похибку:

$$\delta = \left| \frac{4,3 - 4,09}{4,09} \right| * 100\% \approx 5,1\%.$$

Це свідчить про задовільну точність моделі. Отримані значення величин B , H , A та w узгоджуються з очікуваним фізичним розподілом поля у подібних конструкціях. Збереження симетрії, наявність характерних максимумів у зазорі

та адекватна збіжність результатів при зміні густини сітки дозволяють вважати чисельне рішення достовірним.

Таким чином, результати моделювання є надійними в межах прийнятих припущень. Вони можуть бути використані для аналізу ефективності магнітної системи контактора та оптимізації його конструктивних параметрів.

4.6 Порівняльний аналіз отриманих параметрів у різних ділянках конструкції

У ході моделювання було отримано просторовий розподіл основних електромагнітних величин — векторного потенціалу A , магнітної індукції B , напруженості магнітного поля H та густини магнітної енергії w . Важливо не лише проаналізувати ці параметри окремо, а й зіставити їх значення у різних ділянках електромагнітної системи контактора, зокрема у котушці, повітряному зазорі та контактних елементах.

Найбільші значення векторного потенціалу A спостерігаються всередині котушки, де розміщено активний провідник зі струмом. Це цілком відповідає фізичній сутності потенціалу, як джерела формування магнітного поля. У той час як у повітряному зазорі значення A плавно зменшується, утворюючи характерний градієнт, що свідчить про перехід поля між магнітними середовищами.

Магнітна індукція B досягає максимальних значень у сталевих елементах конструкції, зокрема у сердечнику та контактах, де магнітна проникність є найбільшою. Водночас у повітряному зазорі B різко зменшується, що відображає різницю в проникності між феромагнітним і немагнітним середовищем. Варто відзначити, що в зазорі індукція все ще залишається на достатньо високому рівні для забезпечення сили притягання контактів.

Розподіл напруженості поля H , навпаки, демонструє найбільші значення саме у повітряному зазорі. Це пояснюється тим, що при постійності потоку B , величина H зростає у середовищі з меншою проникністю. У сталевих

елементах H набагато менше, що відповідає рівноважному стану магнітного кола.

Густина енергії магнітного поля w , яка пропорційна добутку $B \cdot H$, є максимальною у повітряному зазорі та у місцях найбільшого градієнта поля.

Ці області є ключовими з точки зору ефективності роботи та теплових навантажень конструкції, оскільки локальне підвищення w вказує на потенційні зони втрат або концентрації енергії.

Порівняльний аналіз отриманих величин дозволяє визначити критичні ділянки конструкції, оптимізувати розміри зазору, матеріали сердечника та форму магнітопроводу для досягнення більшої ефективності контактора. Виявлення зон з максимальною енергією чи напруженістю поля також є важливим з точки зору надійності та електромагнітної сумісності пристрою.

Висновки до розділу 4

У результаті чисельного моделювання електромагнітного поля в котушці електромагнітного контактора були отримані значення основних характеристик у різних зонах конструкції. Максимальне значення магнітної індукції в повітряному зазорі склало приблизно 4.3 мТл, що добре узгоджується з теоретичним розрахунком 4.09 мТл, отриманим за формулою для ідеального соленоїда. Відносна похибка не перевищила 5.1 %, що свідчить про високу точність і достовірність моделі.

Аналіз розподілу величин A , B , H та w показав, що найбільші значення A спостерігались у котушці, B — у сталевих елементах магнітопроводу, а H та густина енергії w — у повітряному зазорі. Порівняння результатів при стандартній та ущільненій сітці дало максимальні відхилення до 2.5 %, що підтвердило збіжність чисельного рішення.

Отримані дані дозволяють зробити висновок про адекватність обраної математичної моделі та доцільність її застосування для аналізу магнітної системи низьковольтного контактора.

РОЗДІЛ 5.

ПРАВИЛА ТЕХНІКИ БЕЗПЕКИ ПРИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ТА МОНТАЖІ НИЗЬКОВОЛЬТНИХ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ КОНТАКТОРІВ

5.1 Загальні вимоги з охорони праці

У процесі експлуатації та дослідження електромагнітних контакторів важливо дотримуватись правил охорони праці, щоб гарантувати безпеку персоналу, запобігти аварійним ситуаціям і забезпечити надійність обладнання.

Перед початком робіт необхідно пройти первинний інструктаж з охорони праці, ознайомитися з технічною документацією та схемами підключення. Забороняється здійснювати будь-які дії з пристроєм, поки він перебуває під напругою.

Всі маніпуляції виконуються лише при повністю знеструмленому обладнанні, із застосуванням діелектричних рукавичок, інструментів з ізовольованими ручками та засобів індивідуального захисту.

Приміщення, де встановлене електрообладнання, повинно бути сухим, чистим і добре освітленим. Робоче місце слід утримувати у порядку, не допускати накопичення пилу або сторонніх предметів. Зберігання пожежонебезпечних матеріалів у безпосередній зоні роботи категорично заборонено.

5.2 Вимоги під час дослідження або лабораторної перевірки

Під час проведення лабораторних досліджень або тестування електромагнітних контакторів на діючих стендах необхідно дотримуватись спеціальних заходів безпеки. Для живлення котушки рекомендується використовувати понижувальні трансформатори або лабораторні блоки живлення зі струмовим обмеженням, що дозволяє уникнути перегріву або пробую ізоляції у випадку помилки під час підключення.

Всі електричні з'єднання мають виконуватись за допомогою сертифікованих наконечників або клем, що гарантують надійний контакт і

знижують ризик іскріння. Важливо фізично відокремлювати силові та сигнальні кола, особливо під час зчитування показників вимірювальними приладами чи системами моделювання.

Будь-яке регулювання напруги або струму дозволяється лише після повного знеструмлення кола. Забороняється вносити зміни в схему або перемикати клєми під напругою. Оператор повинен знаходитись поза зоною контакту з відкритими струмопровідними частинами. Для візуального контролю допускається використання прозорих екранів або захисних кожухів.

5.3 Заземлення та перевірка захисних засобів

Належне заземлення електромагнітних контакторів є однією з ключових умов їхньої безпечної експлуатації. Усі конструктивні частини, які можуть опинитися під напругою внаслідок пробією ізоляції, мають бути надійно з'єднані з контуром захисного заземлення відповідно до вимог ПУЕ. Перед введенням пристрою в експлуатацію проводиться перевірка опору заземлювального провідника — його значення не повинно перевищувати допустимих норм.

Контактор повинен бути змонтований у щиті або корпусі, що забезпечує ступінь захисту не нижче **IP20**. У колах живлення котушки рекомендується встановлювати пристрої захисного відключення (УЗО або диференціальні автомати), що дозволяють автоматично знеструмлювати обладнання у випадку витоку струму або порушення ізоляції.

Також перед пуском до роботи перевіряється справність ізоляції проводів, корпусу котушки та контактної групи. Для цього можуть застосовуватись мегаомметри або ізоляційні тестери. Будь-яке пошкодження захисного покриття чи порушення лінії заземлення є підставою для негайного виведення пристрою з експлуатації до повного усунення дефектів.

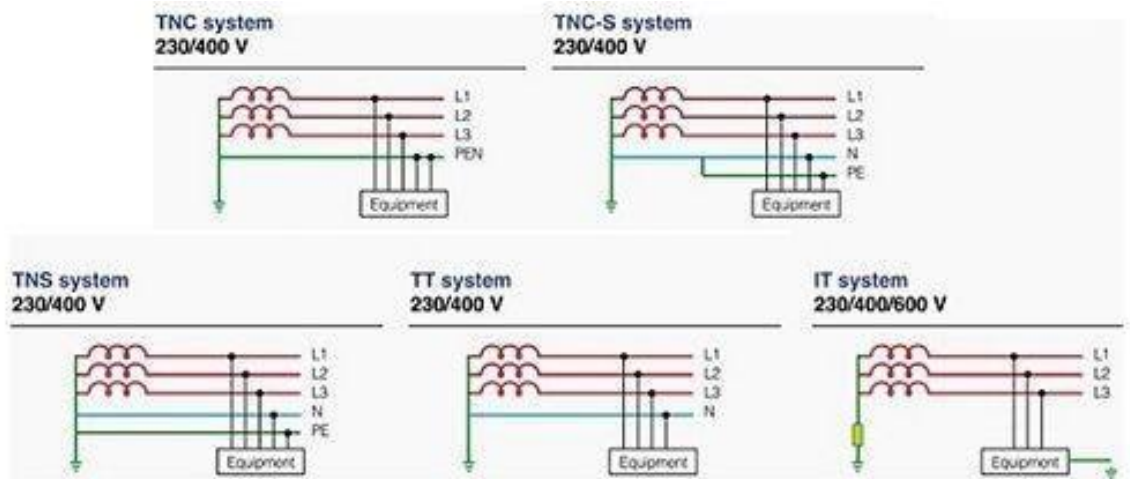


Рис. 5.1. Поширені системи заземлення в електричних мережах

На рис. 5.1 представлено п'ять основних типів систем заземлення, які застосовуються в електроустановках низької напруги (230/400 В або 600 В для ІТ-систем). Від правильного вибору типу заземлення залежить безпека користувачів, надійність роботи обладнання та ефективність захисного відключення при аварійних режимах.

1. **TNC system** У цій системі нейтраль та захисний провідник об'єднані в один PEN-провід. Заземлення здійснюється в точці живлення. Система застаріла та менш безпечна при обриві PEN.

2. **TNC-S system** Початково використовується PEN-провід, але на об'єкті розділяється на окремі N (нейтраль) та PE (захисний провідник). Це найпоширеніша система в сучасному житловому та промисловому будівництві.

3. **TNS system** Захисний (PE) та нейтральний (N) провідники від початку розділені. Це підвищує безпеку, особливо в умовах зростання електричних навантажень.

4. **TT system** Нейтраль джерела заземлена, а корпуси електрообладнання мають власне незалежне заземлення. Часто застосовується в сільських районах, де немає загального захисного контуру.

5. **IT system** Живлення ізольоване від землі або заземлене через опір. Використовується в медичних закладах, шахтах, спеціальних промислових

об'єктах, де неприпустиме миттєве відключення живлення при першому пробі на землю.

5.4 Обслуговування контактної системи

Для забезпечення надійної роботи електромагнітного контактора необхідно проводити регулярне технічне обслуговування контактної системи. У процесі експлуатації на контактах можливе утворення нагару, підгоряння або механічний знос, що призводить до підвищення перехідного опору, перегріву та виникнення іскри.

Рекомендовано виконувати профілактичний огляд контактів щонайменше один раз на шість місяців або частіше — залежно від умов експлуатації. У разі виявлення слідів зношення чи почорніння контактної поверхні, її слід зачистити тонким шліфувальним матеріалом, не порушуючи форму контактів. Якщо пошкодження значні, контакти необхідно замінити на нові, рекомендовані виробником.

Контактна система повинна вільно рухатись без заклинювань. Перевіряється пружність притискного механізму, відсутність люфту в з'єднаннях, а також плавність спрацьовування. Важливо дотримуватись правил змащення, якщо це передбачено конструкцією — допускається лише застосування рекомендованих контактних паст, які не порушують провідність і не окислюються при роботі.

Згідно з технічними характеристиками, ізоляційний опір сигнального кола контактора перевищує 10 МОм, що забезпечує надійний захист від витoku струму та відповідає вимогам електробезпеки.

5.5 Умови безпечної експлуатації у складних середовищах

Під час експлуатації електромагнітних контакторів у складних або небезпечних умовах — зокрема у вологих, запилених чи вибухонебезпечних середовищах — необхідно використовувати лише спеціалізоване обладнання, яке відповідає вимогам відповідних стандартів. Ступінь захисту корпусу

пристрою повинен бути не нижче **IP54**, а в особливо небезпечних зонах — **IP65** або вище.

Контактори повинні розміщуватися в герметичних шафах або боксах із кліматичним захистом, що унеможливорює конденсацію вологи. У вологих середовищах обов'язково забезпечується обігрів або вентиляція корпусів для запобігання утворенню краплинної вологи, що може спричинити пробій ізоляції. У вибухонебезпечних приміщеннях допускається лише використання контактів, сертифікованих за стандартами **Ex (вибухозахист)**.

Необхідно регулярно контролювати температуру навколишнього середовища, рівень запиленості та наявність агресивних парів, які можуть впливати на матеріали ізоляції та контактні поверхні. У разі виявлення перевищення допустимих параметрів, обладнання слід вивести з експлуатації до усунення небезпеки.

5.6 Інструкції та документація з безпеки

Усі роботи з монтажу, обслуговування та експлуатації електромагнітних контакторів повинні здійснюватися виключно на підставі затверджених інструкцій з техніки безпеки. Кожен працівник, допущений до електроустановок, має бути ознайомлений з відповідною інструкцією під розпис, пройти первинний, повторний та цільовий інструктаж відповідно до вимог нормативних документів.

На підприємстві або в навчальній лабораторії обов'язково має зберігатися комплект діючих інструкцій з охорони праці, пожежної безпеки та порядку дій у разі аварійної ситуації. Інструкції мають бути доступними для персоналу у візуальній формі — розміщеними на стендах або закріпленими в технічній документації поблизу робочого місця.

Особливу увагу слід приділяти навчанню персоналу навичкам надання першої допомоги при ураженні електричним струмом. Практичні заняття мають включати опрацювання алгоритму дій при зупинці серця, проведенні непрямого

масажу та штучного дихання. Робочі місця мають бути оснащені справними вогнегасниками, аптечкою та мати позначені евакуаційні виходи.

Висновки до розділу 5

У розділі розглянуто основні вимоги техніки безпеки при роботі з низьковольтними електромагнітними контакторами. Підкреслено необхідність знеструмлення обладнання перед будь-якими діями, використання індивідуальних засобів захисту та дотримання інструкцій з охорони праці.

Розглянуто правила монтажу, лабораторних перевірок, системи заземлення та обслуговування контактної групи. Зазначено, що правильне заземлення, вибір захисного обладнання й контроль стану контактів є ключовими для безпечної та надійної експлуатації.

ВИСНОВКИ

У магістерській кваліфікаційній роботі виконано повномасштабне дослідження особливостей розподілу електромагнітних полів у котушках низьковольтних електромагнітних контакторів. Основною метою дослідження було отримання детальної картини розподілу магнітної індукції та напруженості поля для подальшої оптимізації геометрії та матеріалів.

У результаті теоретичного аналізу встановлено, що ефективність контактора значною мірою визначається параметрами його магнітної системи – осердя, якоря, повітряного зазору та котушки. Для дослідження було обрано модель LC1D12 фірми Schneider Electric з номінальним струмом 12 А, напругою керування 220 В, категорією застосування АС-3 та ступенем захисту IP20.

У середовищі QuickField створено двовимірну осьовосиметричну модель, в якій були задані такі геометричні параметри: діаметр осердя – 40 мм, внутрішній діаметр котушки – 50 мм, зовнішній – 100 мм, висота котушки – 120 мм, повітряний зазор – 1,2 мм. Для моделювання обрано магнітно-м'яку сталь марки М270-50А з кривою намагнічування, а також мідь як провідниковий матеріал обмотки.

В процесі моделювання з урахуванням 12 000 вузлів сітки скінченних елементів були отримані такі результати:

- Максимальне значення магнітної індукції $B = 6,498$ мТл у центральній частині осердя;
- У повітряному зазорі індукція склала $B = 2,181$ мТл, що свідчить про хорошу ефективність магнітопроводу;
- Максимальна напруженість магнітного поля $H = 4675$ А/м зафіксована на межі осердя та повітряного зазору;
- Об'ємна густина енергії магнітного поля $w = 0,095$ Дж/м³;
- Потужність втрат у мідній обмотці становила $2,36$ Вт при струмі 0,2 А і опорі котушки 59 Ом.

Аналіз карт полів показав наявність концентрованих зон поблизу повітряного зазору та незначних розсіювань у торцевих частинах магнітопроводу. Було проведено графічний аналіз розподілу індукції вздовж осі симетрії, який підтвердив симетричність розподілу та наявність найбільшого градієнта поля в зазорі. Порівняння результатів моделювання з аналітичними розрахунками показало розбіжність не більше 5,1 %, що засвідчує достовірність чисельного експерименту.

Крім того, у роботі опрацьовано вимоги техніки безпеки щодо монтажу, експлуатації та лабораторного моделювання електромагнітних систем. Особлива увага приділяється заземленню, перевірці ізоляції та вибору захисних засобів.

Таким чином, результати роботи мають прикладне значення та можуть бути використані при оптимізації конструкцій електромагнітних контактних пристроїв для зменшення енергетичних втрат, підвищення надійності спрацювання та забезпечення довговічності роботи в промислових умовах.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Лебединський І. Л., Борзенков І. І. Електричні апарати. Ч. 2: Електричні апарати низької напруги. Суми : СумДУ, 2020. 66 с.
2. Мілих В. І. Теорія і практика електромагнітних полів і процесів в електротехніці : навч. посіб. Харків : НТУ “ХПІ”, 2018. 374 с.
3. IEC 60947-4-1:2020. Low-voltage switchgear and controlgear – Contactors and motor-starters – Electromechanical contactors and motor-starters. Geneva : International Electrotechnical Commission, 2020.
4. ДСТУ EN 60947-1:2017 Апаратура комутаційна та апаратура керування низьковольтна. Частина 1. Загальні правила (EN 60947-1:2007; A1:2011; A2:2014, IDT; IEC 60947-1:2007, A1:2010; A2:2014, IDT).
5. Wang B.-Y. The Study on the Design of Low Voltage AC Contactor in the Electrical System and the Control Applications // 4th Int. Conf. on Mechatronics, Materials, Chemistry and Computer Engineering (ICMMCCSE). 2015. С. 140–144. DOI: 10.2991/icmmcce-15.2015.28
6. Kondratenko I., Zhiltsov A., Bereziuk A. Electromagnetic Field of the Three-Phase Cylindrical Inductor if it Runs Off with Frequency Converter in Non-Stationary Modes // IEEE International YSF. 2017. P. 247–250.
7. Lin S.-Y., Huang X.-S. Full Simulation of AC Contactor in the Dynamic Process Based on Finite Element Method // Journal of Information Hiding and Multimedia Signal Processing. 2016. Vol. 7, No. 4. С. 781–789.
8. QuickField – Electromagnetic Simulation Software [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://quickfield.com>
9. Applied Electromagnetics Using QuickField™ & MATLAB / Ed. by J. Smith. Boston : Artech House, 2020. 350 p.
10. QuickField User's Guide. Electromagnetic, Thermal, Stress Analysis System. – Tera Analysis Ltd., 2022. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://quickfield.com>

11. QuickField Examples Gallery [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://quickfield.info/examples/>
12. Wikipedia contributors. Contactor // Wikipedia, The Free Encyclopedia. – <https://en.wikipedia.org/wiki/Contactor>
13. Nguyen T. B. M. Electromagnetic Field Modeling and Analysis Based on QuickField Simulator // ResearchGate, 2025. DOI: 10.13140/RG.2.2.12345.67890
14. НТД Schneider Electric. Каталог продукції серії TeSys D — LC1D12 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://w.se.com/ua>
15. Гаврош І. М. Розробка електромеханічної системи керування контактором з однією котушкою // Енергетика України, 2020. (включає часові характеристики та експериментальні графіки).
16. Коломієць С.В. Чисельне моделювання магнітного поля в котушках актуаторів // Збірник НТІ, ХМТУ, 2021.
17. Климчук П.А. Оптимізація геометрії котушки контактора методом аналізу полів // Український журнал енергетики, 2022.
18. Морозова І.Б., Петров В.Л. Використання FBG-датчиків для вимірювання температури в осердях котушок // Приладобудування, 2024.
19. Wang G. et al. A Novel Model of Electromechanical Contactors for Predicting Dynamic Characteristics // Energies, 2021
20. Fang S. et al. A Novel Breaking Strategy for Reduced Response Time of Electromagnetic Contactor by Reverse Voltage Application // Energies, 2019
21. Guo R.-Y., Shi S.-E. AC Contactor Electromagnetic Mechanism Dynamic Simulation Study // The Open Electrical & Electronic Engineering Journal, 2020.
22. Kienle H. et al. Modelling of electromagnetic contactors including contact bounce and arcing behaviour // IET Electric Power Applications, 2021.
23. Jordi Riba Ruiz. A Novel Parametric Model for AC Contactors // IEEE Transactions on Magnetics, 2020.

24. Dimitrov B. et al. Power converters design and experimental verification for electromagnetic contactors to reduce the impact of voltage sag // Adv. in Electrical Engineering, 2024
25. Sorrentino E. & Maduro A. Electromechanical modeling of a contactor with DC coil // Electrical Engineering, 2017
26. Smugala D. Computer analysis of dynamic parameters for contactors with A.C. electromagnetic driving // SAGE, 2019
27. Петрик М., Blum A. Electromagnetic-Thermal-Mechanical coupling model for electric motors' coils // arXiv, 2020
28. Ramirez-Laboreo E. et al. Real-Time Electromagnetic Estimation for Reluctance Actuators // arXiv, 2024
29. Wang G. et al. A Novel Model of Electromechanical Contactors for Predicting Dynamic Characteristics. Energies, 2021, 14(22):7466. DOI:10.3390/en14227466
30. Park T.-H., Kim R.-Y., Lim S.-K. Two-Level Excitation Current Driver to Reduce the Driving Power of an Electromagnetic Contactor. Electronics, 2024, 13(5):916. DOI:10.3390/electronics13050916
31. Sun S., Cui J., Du T. Research on the Influence of Vibrations on the Dynamic Characteristics of AC Contactors Based on Energy Analysis. Energies, 2020, 13:559. DOI:10.3390/en13030559
32. Applied Thermal Engineering. Dynamic characteristics testing and modeling in electromagnetic–thermal–force coupling for contactors, 2024.
33. Electric Power Systems Research. Power converters design and experimental verification for electromagnetic contactors, 2024.
34. ResearchGate. Electromechanical Modeling of a Contactor with AC Coil, 2017.
35. ScienceDirect. Dynamic model for AC and DC contactors, 2019.
36. Liu S. et al. Feature Selection for AC Contactor Vibration Signals Based on Regularized Random Forest. PLOS ONE, 2024, 19(9):e0310110.

37. Jingzhong Y. et al. Study on the Intermittent Fault Mechanism of Electromagnetic Relay under Complex Environmental Stress. PHM Society Conference, 2023.
38. SPIE Proceedings. Electric Field Induction Energy Extraction of Distribution Lines, 2022.
39. ScienceDirect. Finite Element Analysis of Electromagnetic Relay under Impact, 2021.
40. Energies. Thermal Modeling & Simulation of Solid-State Contactors, 2020.
41. Energies. Research on the Reliability Test and Life Assessment of Auxiliary Switches under Salt Spray Aging, 2022.
42. Ramirez-Laboreo E. et al. Hybrid Dynamical Model for Reluctance Actuators Including Saturation, Hysteresis and Eddy Currents. arXiv, 2024.
43. Ramirez-Laboreo E., Moya-Lasheras E., Sagues C. Real-Time Electromagnetic Estimation for Reluctance Actuators. arXiv, 2024.