

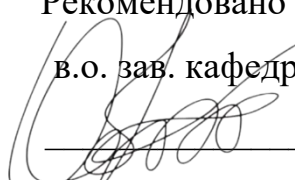
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ КОРАБЛЕБУДУВАННЯ
ІМЕНІ АДМІРАЛА МАКАРОВА

Навчально-науковий інститут автоматики та електротехніки

Кафедра суднових електроенергетичних систем

Рекомендовано до захисту

в.о. зав. кафедри СЕЕС


Обрубов А.В.

«15» грудня 2025 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття ступеня вищої освіти «магістр»

на тему

ОПТИМАЛЬНЕ ПРОЕКТУВАННЯ

ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ АПАРАТІВ

Виконав: здобувач вищої освіти

VI курсу, групи 6365мз

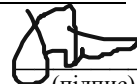
спеціальності 141 – Електроенергетика,
(шифр і назва спеціальності)

електротехніка та електромеханіка

спеціалізації Системи генерування
(назва спеціалізації)

електроенергії та електропостачання

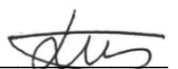
Коваленко О.І.
(прізвище та ініціали)


(підпис)

Керівник Кімстач О.Ю.
(прізвище та ініціали)


(підпис)

Рецензент Білюк І.С.
(прізвище та ініціали)


(підпис)

Миколаїв 2025 р.

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова

(повне найменування вищого навчального закладу)

Навчально-науковий інститут автоматики та електротехніки

(повне найменування інституту, назва факультету (відділення))

Суднових електроенергетичних систем

(повна назва кафедри)

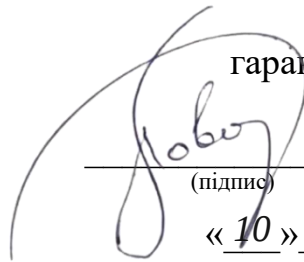
Ступень вищої освіти магістр

Спеціальність 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
(шифр і назва спеціальності)

Спеціалізація Системи генерування електроенергії та електропостачання
(назва спеціалізації)

ЗАТВЕРДЖУЮ

гарант освітньої програми



(підпис)

Новогрецький С.М.

(прізвище та ініціали)

« 10 » вересня 2025 р.

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ
на здобуття ступеня вищої освіти «магістр»

Здобувачу вищої освіти Коваленко Олександр Ігоровичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Оптимальне проектування електромагнітних апаратів

науковий керівник роботи Кімстач О.Ю., к.т.н, доц.
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом НУК від «14» жовтня 2025 р. № 1217-уч.

2. Строк подання студентом роботи «15» грудня 2025 р.

3. Об'єкт дослідження електричні апарати

4. Предмет дослідження оптимальне проектування

5. Перелік задач, які потрібно вирішити визначити властивості та основні параметри електричних апаратів; розробити алгоритм комплексної оптимізації електричних апаратів для підвищення їх характеристик; застосувати розроблений алгоритм на прикладі

6. Перелік тем публікацій за алгоритмом оптимізації

7. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)
узагальнена конструктивна схема апарата, блок-схема алгоритму оптимізації, результати застосування розробленого алгоритму.

8. Дата видачі завдання «17» вересня 2024 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/П	Назва етапу роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Вивчення стану проблеми підвищення ефективності роботи електричних апаратів	31.12.2024	<i>виконано</i>
2	Аналіз існуючих конструктивних та схемо-технічних рішень електричних апаратів	31.05.2025	<i>виконано</i>
3	Формування алгоритму пошуку оптимальних конструктивних параметрів електричного апарата	01.10.2025	<i>виконано</i>
4	Приклад застосування розробленого алгоритму	01.11.2025	<i>виконано</i>
5	Оформлення випускової роботи	10.12.2025	<i>виконано</i>

Здобувач вищої освіти



(підпис)

Коваленко О. І.

(прізвище та ініціали)

Науковий керівник



(підпис)

Кімстач О.Ю.

(прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

У магістерській роботі виконане дослідження шляхів вдосконалення електричних апаратів з метою підвищення їх технічного рівня.

Проведено аналіз типових конструктивних рішень електричних апаратів, визначені їх основні технічні показники та вимоги до них. Розглянуті методи та критерії параметричної оптимізації. Викладено алгоритм параметричної оптимізації електромагнітного електричного апарата. Наведено приклад застосування запропонованого алгоритму оптимізації для типового проектного завдання електромагнітних електричних апаратів.

Ключові слова: алгоритм, електричний апарат, метод, оптимізація.

SUMMARY

The master's thesis researches ways to increase the technical level of electrical devices.

Typical design solutions for electrical devices have been analysed, and their main technical indicators and requirements have been determined. Methods and criteria for parametric optimization have been considered. An algorithm for parametric optimization of an electromagnetic electrical device has been presented. An example of the application of the proposed optimization algorithm for a typical design task of electromagnetic electrical devices has been given.

Keywords: algorithm, electrical device, method, optimization.

ЗМІСТ

ВСТУП	8
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ КОНСТРУКТИВНИХ СХЕМ ТА ПАРАМЕТРІВ ЕЛЕКТРИЧНИХ АПАРАТІВ	11
1.1. Класифікація електричних апаратів	11
1.2. Номінальні параметри високовольтних комутаційних апаратів	16
1.3. Кліматичне виконання та категорії розміщення елект- ричних апаратів	18
1.4. Вимоги до електричних апаратів	20
1.5. Електромагнітні апарати	21
1.6. Магнітні кола апаратів постійного струму	25
Висновки до розділу 1	29
РОЗДІЛ 2. МЕТОДИ ПАРАМЕТРИЧНОЇ ОПТИМІЗАЦІЇ	30
2.1. Формування завдання оптимізації	30
2.2. Класифікація критеріїв оптимізації	32
2.3. Методи оптимізації	37
Висновки до розділу 2	53
РОЗДІЛ 3. АЛГОРИТМ ОПТИМІЗАЦІЇ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ЕЛЕКТРИЧНОГО АПАРАТА	54
3.1. Постановка завдання оптимізації	54
3.2. Оптимізація за масою активної частини	55
3.3. Оптимізація за втратами потужності.	57
3.4. Оптимізація за сталою часу	58
3.5. Комплексна оптимізація	58
Висновки до розділу 3.	59
РОЗДІЛ 4. ПРАКТИЧНЕ ЗАСТОСУВАННЯ АЛГОРИТМУ ОПТИМІЗАЦІЇ УЗАГАЛЬНЕНОГО ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО АПАРАТА	60
4.1. Вихідні дані для розрахунку	60

4.2. Результати розрахунку	60
Висновки до розділу 4.	64
ВИСНОВКИ.....	65
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	66
ДОДАТОК А. Розрахунок оптимізації електромагніту	68
ДОДАТОК Б. Копія сертифікату учасника конференції	80

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

ЕА – електричний апарат

ЕЕ – електроенергія

ЕРС – електрорушійна сила

КЗ – коротке замкнення

ММ – математична модель

МРС – магніторушійна сила

ОП – об'єкт проектування

СЕП – система електропостачання

ЦФ – цільова функція

ВСТУП

Електричне обладнання потребує застосування релейних систем захисту. З урахуванням високих умов надійності електропостачання та важливості кожного споживача, пристрої захисту повинні якнайшвидше локалізувати аварійне обладнання [17]. Для цього необхідно застосування максимально швидкодіючих апаратів захисту. Найбільше поширення отримали апарати захисту з електромагнітним принципом дії [9-14].

Тому виникає питання дослідження експлуатаційних характеристик апаратів захисту, які побудовані за електромагнітним принципом, та визначення шляхів їх покращення.

Електроенергетика у сучасних ринкових умовах переходить на якісно новий рівень свого розвитку. У першу чергу це стосується розвитку нових технологій зберігання енергії при її виробництві, розподілі та споживанні і підвищення рівня використання вторинних енергетичних ресурсів.

Одним з ключових напрямків в реалізації енергозберігаючих технологій, які визначають ефективність роботи як електроенергетики на всіх етапах виробництва, розподілу та споживання електричної енергії (ЕЕ), так і інших галузей виробництва є розвиток галузі електроапаратобудування [11].

Виникає необхідність виробництва не просто більшої кількості електричних апаратів (ЕА), а апаратів, які забезпечили б більш ефективну роботу електроустановок.

Актуальною є модернізація існуючих та розробка нових типів ЕА на основі сучасних технологій, підвищення рівня напружень та струмів, зменшення габаритів та маси, підвищення їх надійності, ресурсу та швидкодії. Ці вимоги розглядаються тому, що переважна більшість ЕА повинні досить ефективно працювати в сучасних автоматизованих та автоматичних системах керування складними технологічними процесами, агрегатами, машинами та обладнанням систем електропостачання (СЕП).

Забезпечення цих вимог щодо ЕА є можливим тільки на основі глибоких теоретичних знань про фізику процесів та явищ, які протікають в ЕА при різних режимах їх роботи в електроустановках.

Окрім підвищених вимог до якості ЕА, поліпшення їх технічних характеристик та культури експлуатації виникають також підвищені вимоги і до підготовки кваліфікованих інженерно-технічних кадрів та науковців, які будуть основною рушійною силою прогресу та ефективного функціонування сучасної електроенергетики [17].

Вирішення означеної проблеми можна досягти за рахунок застосування параметричної оптимізації [6], але необхідно визначити її критерії та алгоритм. Бажано, щоб алгоритм був би універсальним та простим. Тому розробка узагальненого алгоритму оптимізації ЕА являється *актуальним* питанням.

Ці питання досліджень являються складовими частинами магістерської роботи.

Метою магістерської роботи є покращення характеристик електромагнітних електричних апаратів шляхом застосування параметричної оптимізації.

Завдання магістерської роботи:

- визначити часткові критерії оптимізації;
- визначити комплексний критерій оптимізації;
- розробити алгоритм оптимізації;
- застосувати розроблений алгоритм на прикладі типового завдання проектування ЕА.

Об'єкт дослідження – електричні апарати.

Предмет дослідження – оптимальне проектування.

Практичне значення отриманих результатів дозволяє:

- досягти зменшення капітальних та експлуатаційних витрат СЕП;
- покращити показники безпеки роботи електрообладнання.

Особистий внесок:

- побудова алгоритму оптимізації електромагнітного ЕА узагальненої конструкції;
- виконання прикладу розрахунку застосування розробленого алгоритму.

Результати досліджень: розглядалися на засіданнях кафедри Суднових електроенергетичних систем.

За результатами досліджень опублікована одна стаття [8].

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ КОНСТРУКТИВНИХ СХЕМ ТА ПАРАМЕТРІВ ЕЛЕКТРИЧНИХ АПАРАТІВ

1.1. Класифікація електричних апаратів

Електричний апарат – це електротехнічний пристрій, призначений для керування електричними і неелектричними об'єктами, регулювання, вимірювання та контролю електричних і неелектричних параметрів різних пристроїв, машин, механізмів, а також для захисту цих об'єктів при ненормальних та аварійних режимах роботи електричних мереж та систем [1-4]. Електричні апарати широко використовуються на електричних станціях, підстанціях, системах передачі та перетворення електричної потужності, системах захисту електричних мереж, в пуско-регулювальних пристроях, які застосовуються в різних виробничих процесах, в системах автоматики і телемеханіки, зв'язку тощо. Вимоги, які висуваються до ЕА, визначаються областю їх застосування, призначенням, режимами роботи і багатьма іншими чинниками. Поняття «*електричний апарат*» охоплює дуже широке коло побутових і промислових електричних пристроїв [1].

Різноманітність конструкцій ЕА, принципів їх роботи, виконуваних ними функцій в електричних мережах та поєднання в одному апараті, як правило, декількох функцій не дозволяють класифікувати їх за однією якоюсь ознакою. Доцільним є класифікація ЕА за їх призначенням, тобто за основною функцією, яку він виконує. За виконуваних функцій електричні апарати можна розділити на комутаційні, захисні, пускорегулювальні, регулювальні, обмежувальні, вимірювальні, контрольні. Однак чіткої межі між цими групами може не бути, оскільки класифікація визначається призначенням електричного апарату в конкретній схемі розподільної установки.

Апарати класифікуються також за принципом дії, залежно від того, яке фізичне явище використано в основі їх пристрою (наприклад, електромагнітні, теплові, індукційні електричні апарати).

Комутаційні електричні апарати призначені для перемикачів електричних кіл (комутації) при нормальних режимах роботи, коли дія пов'язана зі зміною режимів роботи кола, увімкненням та зняттям напруги, або для вимкнення електри-

чних кіл в аварійному режимі. Частота операцій може бути відносно невелика – від однієї операції на рік до декількох десятків операцій за добу. До цієї групи відносяться роз'єднувачі, вимикачі високої і низької напруги (автоматичні і неавтоматичні), рубильники, перемикачі тощо [1].

Автоматичні вимикачі низької напруги забезпечують одночасно функції комутації силових кіл (струми від одиниць ампер до десятків тисяч) і захисту електричних приймачів та мереж від перевантажень і коротких замикань. Апарати мають тепловий розчіплювач і, як правило, електродинамічний розчіплювач, забезпечуються дугогасильними пристроями. Основні види автоматичних вимикачів: універсальні, стаціонарні, швидкодіючі, для гасіння магнітного поля, захисту від стікань на землю.

Швидкодіючі автомати постійного струму встановлюються зазвичай в перетворюючих установках. Час їх спрацювання вимірюється декількома сотими долями секунди. Автомати гасіння магнітного поля призначені для гасіння поля збудження потужних синхронних машин при виникненні в них внутрішнього короткого замикання [4].

Автомати захисту від струмів витоку на землю служать для захисту людей від ураження електричним струмом, а також від струмів короткого замикання і перевантажень в мережах з заземленою нейтральною точкою.

Переважного поширення набули універсальні та стаціонарні автоматичні вимикачі. Стаціонарні відрізняються від універсальних лише наявністю ізоляційного кожуха, завдяки чому вони можуть встановлюватися в загальнодоступних приміщеннях. Універсальні автомати постійного і змінного струмів працюють, головним чином, в розподільних пристроях низької напруги.

Захисні електричні апарати призначені для захисту електроустаткування від різних аварійних режимів, пов'язаних з появою струмів перевантаження і короткого замикання, неприпустимого зниження напруги, появою струмів витоку на землю при пошкодженні ізоляції, зворотних струмів тощо. Ці апарати підрозділяються на автоматичні вимикачі та низьковольтні й високовольтні запобіжники.

Автоматичні вимикачі (автомати) вмикаються та вимикаються відносно не-

часто. Автомати на різні номінальні струми здатні вимикати великі струми короткого замикання (до 150 кА). При цьому вимкнення відбувається з вираженим струмообмежувальним ефектом. Автомати мають зазвичай складні контактні та дугогасильні пристрої.

Низьковольтні запобіжники служать для захисту електроустаткування від великих струмів перевантаження і струмів короткого замикання. Розрізняються запобіжники з відкритою плавкою вставкою, закриті (плавка вставка розміщена в патроні) і запобіжники з наповнювачем, в якості котрого використовується кварцовий пісок.

Обмежувальні – призначені для обмеження в електричних колах струмів короткого замикання і перенапружень. Обмежувальні електричні пристрої служать для захисту електричних кіл в аварійних режимах роботи і від струмів перевантаження або для обмеження діючого значення струмів короткого замикання. До цього класу належать струмообмежувальні реактори, струмообмежувальні запобіжники, трубчаті та вентильні розрядники, обмежувачі перенапружень [4].

Пускорегулювальні призначені для керування електроприводом та іншими споживачами ЕЕ. Пускорегулювальні електричні пристрої служать або для пуску, регулювання частоти обертання і зупинки електричних машин, або для увімкнення та вимкнення споживачів ЕЕ, а також регулювання процесу споживання енергії. До цього класу належать контактори, контролери, магнітні пускачі, реостати, електричні дроселі тощо. Деякі з цих ЕА за безпосередньо виконуваних функцій можуть бути віднесені до комутаційних (наприклад, магнітні пускачі, контролери), але відрізняються від них дещо більшою частотою виконуваних операцій – до декількох сотень або тисяч операцій на годину [10].

Апарати контролю, основне призначення яких це контроль заданих електричних і неелектричних параметрів в електричних колах і для впливу на коло керування. Інформація про зміну параметрів надходить зазвичай на контрольні ЕА від вимірювальних трансформаторів або перетворювачів. До цієї групи відносяться реле та датчики.

Регулювальні призначені для автоматичної безупинної стабілізації або регу-

лювання заданого параметра. Регулювальні ЕА використовуються в електричних колах для регулювання по заданому закону або підтримки на заданому рівні значень певних параметрів (наприклад, регулятори, що підтримують незмінним струм або напругу – стабілізатори) [11].

Вимірювальні призначені для ізоляції кіл первинної комутації (головного кола струму) від кіл вимірювальних і захисних приладів. Вони перетворюють вимірювану величину (струм або напругу) до стандартного значення зручного для вимірювань. До них відносяться вимірювальні трансформатори струму та напруги, а також ємнісні дільники напруги.

Застосування вимірювальних електричних апаратів дозволяє забезпечити надійне гальванічне розділення вторинних кіл (вимірювання та захисту) і первинних високовольтних кіл.

Класифікація апаратів за умовами застосування більш умовна. Апарати, що обслуговують електричні системи, мережі та системи електропостачання, об'єднуються в групу *апаратів розподільних пристроїв* низької та високої напруги.

Велику групу апаратів, які застосовуються для схем автоматичного керування електроприводами і для автоматизації виробничих процесів, зручно об'єднати в групу *апаратів керування*. Але одні й ті ж апарати можуть знаходитись і серед апаратів розподільних пристроїв, і серед апаратів керування, наприклад, рубильники, пакетні вимикачі, контактори, автоматичні повітряні вимикачі, вимірювальні трансформатори струму, реле тощо [11].

Високовольтні вимикачі – це електричні комутаційні апарати, які призначені для оперативного увімкнення та вимкнення електричних мереж та ланок в нормальних та аварійних режимах роботи.

Вимикач є основним комутаційним апаратом в електричних установках різних номінальних напружень. Він служить для увімкнення та вимкнення електричних кіл в різних режимах роботи електричних мереж: тривалому навантаженні, перевантаженні, короткому замиканні, холостому ході, несинхронній роботі.

Найбільш важкою і відповідальною операцією є вимкнення струмів корот-

ких замикань (КЗ) і увімкнення вимикача на відповідне коротке замикання. Велике значення має аперіодична складова струму КЗ (рис. 1.1).

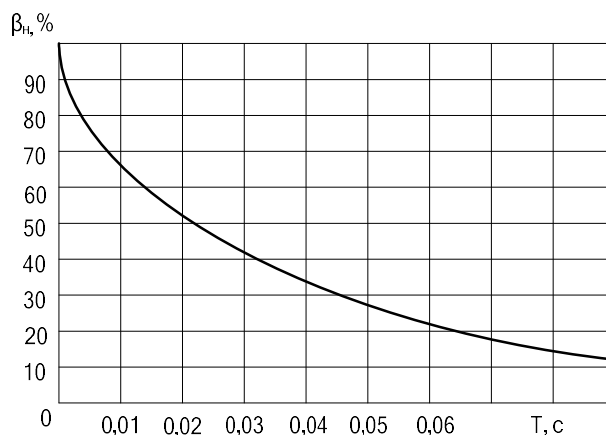


Рис. 1.1. Нормований склад аперіодичної складової струму КЗ

Виконуються високовольтні вимикачі на номінальні струми від 50 А до 63 кА, номінальні напруги від 3 кВ до 1150 кВ, з потужністю вимкнення від 50 ВА до 50000 МВА.

Основним фактором, який визначає конструкцію вимикачів, є спосіб гасіння дуги.

В свою чергу, кожна з груп вимикачів розподіляється ще за рядом ознак:

- *за часом дії* — швидкодіючі (0,04...0,08 с), прискореної дії (0,08...0,12 с) та нешвидкодіючі (0,12...0,25 с);
- *за кількістю фаз* — одно- та трифазні. В залежності від кількості розривів на одну фазу — з одно-, дво- та багатократними розривами;
- *за конструктивним зв'язком з приводом* — з окремим та вбудованим приводом, кожен з яких виконується або ручним, або автоматичним;
- *за способом встановлення* — для внутрішнього і зовнішнього встановлення та для вибухонебезпечного середовища;
- *за наявністю циклу АПУ* (автоматичного повторного увімкнення) — одноступеневого, багатоступеневого, пофазного та швидкодіючого;
- *за виконуваними функціями в схемах розподільних пристроїв* — генераторні, розподільні: фідерні та для підстанцій.

1.2. Номінальні параметри високовольтних комутаційних апаратів

Кожний високовольтний електричний апарат змінного струму має ті або інші номінальні параметри, які можуть бути загальними для усіх типів або притаманні тільки одному або деяким з них. Загальними номінальними параметрами для всіх високовольтних апаратів є *номінальна напруга* і *номінальна частота* [11].

Окрім зазначених вище, відповідно до держстандартів, високовольтні вимикачі характеризуються такими основними параметрами:

1. *Номінальний струм* $I_{\text{ном}}$ – діюче значення струму, який апарат повинен пропускати без пошкоджень при номінальній частоті з температурою різних частин, що не перевищує встановлених значень.

2. *Номінальний струм вимкнення* $I_{\text{вим,ном}}$ – найбільший струм КЗ (діюче значення), який вимикач здатний вимкнути при напрузі, що дорівнює найбільшій робочій напрузі, при заданих умовах відновлювальної напруги і заданому циклі операції. Номінальний струм вимкнення визначається діючим значенням періодичної складової у момент розходження контактів.

3. *Допустимий відносний вміст аперіодичної складової струму в струмі вимкнення* β_n , %, яке визначається по кривій рис. 1.1:

$$\beta_n = \frac{i_{a,\text{ном}}}{\sqrt{2}I_{\text{отк,ном}}} \cdot 100.$$

Нормоване значення β_n визначається для моменту розходження контактів за виразом

$$\tau = t_{3,\text{min}} + t_{c,v} = 0,01 + t_{c,v}.$$

Якщо $\tau > 0,09$ с, тоді приймається β_n рівним нулю.

4. *Цикл операцій* – послідовність комутаційних операцій з заданими інтервалами між ними. В експлуатації вимикач може неодноразово вмикатись на існуюче КЗ з подальшим вимкненням, тому передбачається для вимикачів визначений цикл операцій.

Для вимикачів з АПУ безструмова пауза $t_{\text{от}}$ повинна бути в межах 0,3...1,2 с, для вимикачів без пристроїв повторного увімкнення – 0,3 с.

5. *Стійкість при наскрізних струмах*, яка характеризується струмами термічної стійкості $I_{\text{тер}}$ і електродинамічної стійкості $I_{\text{дин}}$ (діюче значення), $i_{\text{дин}}$ – найбільший пік струму (амплітудне значення). Ці струми вимикач витримує в увімкненому стані без пошкоджень. Завод-виробник при виготовленні вимикачів повинен дотримуватись співвідношення:

$$i_{\text{дин}} = 2,55 \cdot I_{\text{вим,ном}}.$$

6. *Номинальний струм увімкнення* – струм КЗ, який вимикач з відповідним приводом здатен увімкнути без приварювання контактів й інших пошкоджень, при $U_{\text{ном}}$ і заданому циклі операцій. В каталогах наводиться діюче значення цього струму $I_{\text{вкл,ном}}$ і його амплітудне значення $i_{\text{вкл,ном}}$.

Вимикачі конструюються таким чином, щоб дотримувалась умова:

$$I_{\text{вкл,ном}} \geq I_{\text{вим,ном}}, I_{\text{вкл,ном}} \geq 1,8 \sqrt{2} I_{\text{вим,ном}}.$$

7. *Власний час вимкнення* $t_{\text{вл.,в}}$ – проміжок часу від моменту подачі команди на вимкнення до моменту переривання дотику дугогасильних контактів.

Час вимкнення $t_{\text{вим.,в}}$ – проміжок часу від подачі команди на вимкнення до моменту погашення дуги на всіх полюсах.

Час увімкнення $t_{\text{увм.,в}}$ – проміжок часу від подачі команди на увімкнення до виникнення струму в колі.

8. *Параметри відновлювальної напруги* – у відповідності з нормованими характеристиками власної перехідної відновлювальної напруги для кожного типу вимикача.

9. *Вимикачі*, які не призначені для АПВ, повинні витримувати не менше п'яти операцій перемикавання при струмах КЗ $(0,6 \dots 1) I_{\text{вим.,ном}}$ без огляду дугогасильного пристрою.

Вимикачі, які призначені для АПВ, повинні витримувати в тих же умовах від 6 до 10 операцій перемикавання у залежності від величини $I_{\text{вим.,ном}}$.

1.3. Кліматичне виконання та категорії розміщення електричних апаратів

За кліматичним виконанням електричні апарати розподіляються на апарати, призначені для експлуатації в таких мікрокліматичних районах:

1. На землі, річках і озерах:

- з помірним кліматом.....У (N)
- з помірним і холодним..... УХЛ (NF)
- з вологим тропічним... .. ТВ (TH)
- з сухим тропічним... .. ТС (TA)

2. Загально-тропічне виконання

- з сухим і вологим тропічним кліматом.....Т (T)

3. Загально-кліматичне виконання

- з любым кліматом на землі, окрім холодного..... О (U)

4. З морським кліматом

- з помірна-холодним морським..... М (M)
- з тропічним морським, в тому числі і для кораблів каботажного плаванняТМ (MT)
- як з помірна-холодним морським, так і з тропічним морським, в тому числі для кораблів необмеженого району плавання.....ОМ (MU)

5. Всекліматичне виконання

- у всіх районах на землі і морі, окрім районів з дуже холодним кліматом..... В (W)

Латинські букви, які стоять в скобках, відповідають позначенням кліматичних районів, прийнятих в країнах Євросоюзу (ЕС).

Апарати у виконанні У і УХЛ можуть експлуатуватися в теплій і жаркій зонах, в яких температура повітря (середня із щорічних температурних максимумів) вище 40°C або сумісність температури, рівній 20°C і вище, з відносною вологістю, рівною 80% і вище, спостерігається більше 12 год. на добу без перериву на протязі двох місяців в році.

Якщо апарат розроблений для експлуатації в районах з холодним кліматом і

економічно недоцільно використовувати його в межах цього району, замість позначення УХЛ приймається позначення ХЛ.

За місцем встановлення апарата в розподільчих установках високої напруги поділяються на п'ять узагальнених категорій розміщення.

Категорія 1 – на відкритому повітрі.

Категорія 2 – під навісом або в приміщеннях, де коливання температури і вологості повітря не дуже відрізняється від коливань їх на відкритому повітрі і є порівняно вільний доступ оточуючого повітря, наприклад в палатках, кузовах, причепах, металічних приміщеннях без теплоізоляції, в оболонці комплектного виробу категорії 1 (відсутність прямого сонячного випромінювання і атмосферних опадів).

Категорія 3 – в закритих приміщеннях (об'ємах) із природною вентиляцією без штучних регулюючих кліматичних умов, де коливання температури і вологості повітря і дія піску і пилюки істотно менше, ніж на відкритому повітрі, наприклад в металічних приміщеннях з теплоізоляцією, камінних, бетонних і дерев'яних приміщеннях (істотне зменшення дії сонячної радіації, вітру, атмосферних дій, відсутності роси).

Категорія 4 – в приміщеннях (об'ємах) з штучними кліматичними умовами, наприклад в закритих опалюваних або охолоджуваних і провітрюваних промислових або інших приміщеннях, в тому числі і добре провітрюваних підземних (відсутність прямого сонячного опромінення, атмосферних опадів, вітру, піску і пилю, зовнішнього повітря, відсутність або зменшення розсіяного сонячного опромінення і конденсації вологи).

Категорія 5 – в приміщеннях (об'ємах) з підвищеною вологістю, наприклад в неопалюваних і непровітрюваних підземних приміщеннях, в тому числі в шахтах, підвалах, землі, в корабельних приміщеннях, судових і інших приміщеннях, в яких можливо довготривала присутність води або часта конденсація вологи на стінах і стелі приміщень.

Крім узагальнених категорій розміщення є додаткові.

Категорія 1.1 – до експлуатації в приміщеннях категорії 4, а робота як в

умовах категорії 4, так і інших умовах, в тому числі і на відкритому повітрі.

Категорія 2.1 – вмонтовані елементи всередині комплектних виробів категорій 1, 1.1 та 2, конструкція яких виключає конденсацію вологи на вмонтованих елементах.

Категорія 3.1 – в нерегулярно опалюваних приміщеннях (об'ємах).

Категорія 4.1 – в приміщеннях з кондиціонуванням або частковим кондиціонуванням повітря.

Категорія 4.2 – в лабораторіях, капітальних жилих й інших приміщеннях подібного типу.

Категорія 5.1 – вмонтовані елементи всередині комплектних виробів категорії 5, конструкція яких виключає конденсацію вологи на вмонтованих елементах.

Об'єднання кліматичного виконання і категорії розміщення називається *видом кліматичного виконання* (наприклад, УЗ, ХЛ1 тощо). Символи, що позначають вид кліматичного виконання, включаються у позначення типу виробу.

Апарати кліматичного виконання У4, ХЛ4, У4.1, ХЛ4.1, У4.2, ХЛ4.2, Т4, Т4.1, Т4.2, ТС2.1 не виготовляються. Замість них потрібно використовувати вид кліматичного виконання УХЛ4, УХЛ4.1, УХЛ4.2, ТС2, В3 і В3.1.

Інтенсивність дощу складає для апаратів виконання У, ХЛ, ТС 3 мм/хв., а для виконання ТВ, Т, О, М, ТМ, ОМ і В – 5 мм/хв. Під інтенсивністю дощу розуміється висота слою води (в міліметрах), який утворюється в горизонтально розташованому водозбірнику за одну хвилину від рівномірно падаючого під кутом 45° до горизонталі дощу краплинної структури. Питомий електричний опір води складає $100 \pm 10 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ при 20°C .

1.4. Вимоги до електричних апаратів

Вони дуже різноманітні й залежать від призначення, умов експлуатації, необхідної надійності [1]. Однак для усіх апаратів існують загальні вимоги, яким вони повинні відповідати:

1) апарати, ввімкнені в коло послідовно (вимикачі, автомати, контактори), обтикаються струмом цього кола, тому в номінальних режимах температура

струмоведучих елементів апарата не повинна перевищувати значень, рекомендованих стандартами;

2) при КЗ струмоведуче коло апарата зазнає динамічних перевантажень, які викликані великим струмом. Ці перевантаження не повинні викликати залишкових явищ, що заважають подальшій нормальній роботі апарата, тому апарати, які за умовами роботи можуть вмикати і вимикати струми короткого замикання, повинні мати контакти, розраховані на цей режим роботи, а апарати, призначені для частого вмикання і вимикання номінального струму навантаження, повинні мати високу механічну й електричну стійкість спрацьовування;

3) ізоляція електричних апаратів повинна розраховуватися з умов можливих перевантажень, які можуть бути при роботі установки, з деяким запасом, що враховує поширення властивостей ізоляції при експлуатації внаслідок осадження пилу, бруду й вологи;

4) до кожного апарата висувається ряд специфічних вимог, зумовлених його призначенням. Так, вимикач високої напруги повинен вимикати струм КЗ за малий час (0,04...0,06 с). Трансформатор струму повинен давати струмову і кутову похибку, що не перевищують певного значення. Контактір повинен мати високу механічну й електричну стійкість до спрацьовування;

5) у зв'язку з широкою автоматизацією виробничих процесів, використанню складних схем автоматики збільшується кількість апаратів, які беруть участь у роботі і, отже, підвищуються вимоги до надійності апаратів;

6) усі без винятку апарати повинні мати малу масу, вартість та габарити. На їх установку та обслуговування повинно витрачатися небагато часу. Апарати повинні мати конструкцію, що дозволяє широко впроваджувати автоматизацію виробничих процесів при їх виготовленні.

1.5. Електромагнітні апарати

Електромагнітне реле – пристрій, що має групу контактів, які міняють свій стан на протилежне при подачі керуючої напруги [2].

Інакше електромагнітні реле – це електричні реле, у яких призначена реак-

ція створюється через вплив електромагнітних сил. Вимоги до електромагнітних реле сформульовано в стандарті ІЕС 60810-1. В цих реле (рис. 1.2) елементом керування є котушка реле 1, яка створює магнітний потік у магнітопроводі. Рухома частина 2 (проміжний елемент реле) при певному значенні напруги U , прикладеної до обмотки, починає рухатися і сприяє перемиканню контактів 3 (комутаційний елемент реле).

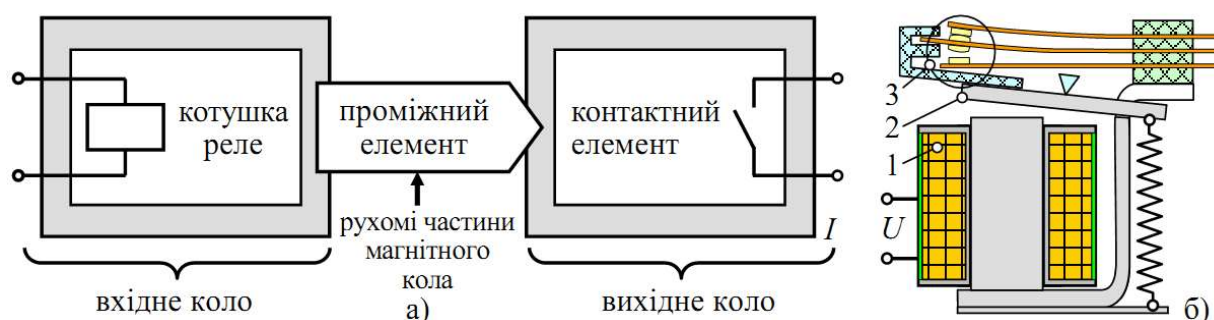


Рис. 1.2. Електромагнітне реле:

а – структурна схема; б – приклад конструктивного виконання

Простими словами, реле – це вимикач, який вимикається не вручну людиною, а електричним способом, за допомогою подачі керуючого сигналу.

Принцип дії реле. Реле складається з котушки, якоря й групи контактів.

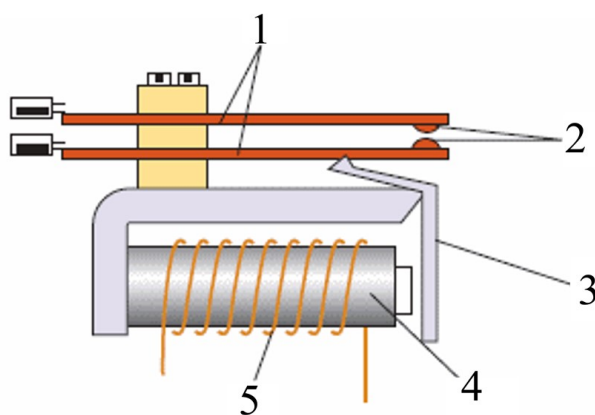


Рис. 1.3. Конструктивна схема електромагнітного реле:

1 – провідники контактів реле, 2 – контакти реле, 3 – якорь, 4 – осереддя, 5 – котушка

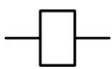
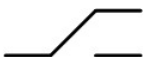
Принцип дії реле надзвичайно простий. Якщо подати на котушку керуючу напругу, у ній виникне магнітне поле й притягне якорь, який у свою чергу замкне контакти. На рис. 1.3 зображене реле з однієї групою контактів, але в загальному випадку груп контактів може бути багато. При виникненні в котушці магнітного поля, усі вони міняють своє положення на протилежне. Це означає, що вони мо-

жуть бути не тільки нормально розімкнуті, але й нормально замкнені.

Нормально замкнений і нормально розімкнений контакт. Розрізняються два основні види контактів реле: *нормально закриті (НЗ)* і *нормально відкриті (НВ)*. Назви відбивають стан контактів в «нормальному» режимі, коли на котушці реле немає напруги. Нормально закриті контакти замкнені в нормальному стані, а нормально відкриті – розімкнуті.

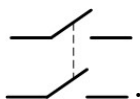
Ще одні тип контактів – *перекидні*. Їх не можна назвати ні нормально закритими, ні нормально відкритими, оскільки вони мають і той і інший контакт. При перемиканні реле, такий контакт розмикає одне коло і замикає інше. Це відбивається при їх графічному позначенні на схемі.

Позначення. На електричних схемах реле позначаються як кілька окремих елементів:

- котушка 
- НЗ контакт 
- НВ контакт 
- перекидний 

Умовний розподіл на різні елементи вводиться винятково для зручності. Це дозволяє розміщати котушку й контакти в різних частинах схеми, щоб вона вийшла більш компактною. При цьому всі елементи одного реле позначаються тим самим буквеним кодом, тому що конструктивно – це один елемент.

Також для зручності деякі елементи реле можуть зображуватися на схемі й спільно. Наприклад, так може бути позначена група нормально відкритих контактів:

тів: 

Електромагнітні реле захисту. Ці реле переважно застосовуються у тривалому режимі роботи, тому пропонувані до них вимоги по механічній і комутаційній зносостійкості менш тверді, чим до реле керування. Електромагнітні реле захисту випускаються різних серій. Схему одного з них – реле струму РТ-40 наведено на рис. 1.4.

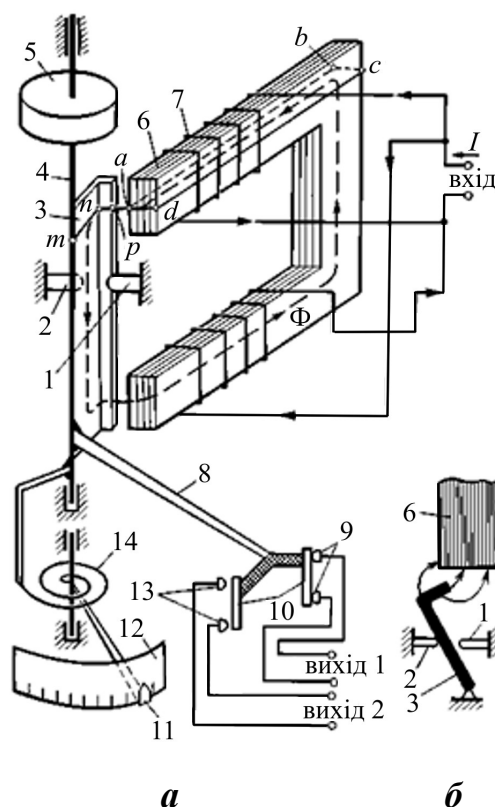


Рис. 1.4. Електромагнітне реле струму РТ-40:

а – загальна схема; б – ярів і сердечник реле РТ-40 у перетині площиною $mnpdcb$

На шихтованому магнітопроводі 6 П-подібної форми розміщено дві обмотки 7, що створюють потік Φ . Потік замикається по Г-подібному ярю 3. Під впливом електромагнітного моменту ярів прагне повернутися за годинниковою стрілкою (рис. 1.4, б) від упору 2 до упору 1. Механічний момент створюється спеціальною пружиною 14. При струмі спрацьовування діючий електромагнітний момент при всіх кутах повороту ярю (від початкового до кінцевого, обумовлених упорами 2 і 1) більше протидіючого механічного. З ярком за допомогою ізоляційного важеля 8 жорстко зв'язано два рухливі контактні містки 10. На початку повороту ярю при спрацьовуванні правий місток розімкне контакт-деталі 9, а лівий наприкінці повороту ярю замкне контакт-деталі 13. При струмі повернення під дією механічного моменту ярів повернеться проти годинникової стрілки [4].

Реле РТ-40, як реле захисту, повинне мати високий коефіцієнт повернення. Цього можна досягти наближенням тягової характеристики реле до механічної. Однак, їх надмірне зближення при кінцевому положенні ярю призводить до неприпустимого зниження контактного натискання на замикаючих контактах. Рацио-

нальне узгодження характеристик здійснюється зміною положення упорів 1 і 2.

Грубе регулювання струму спрацьовування реле (в 2 рази) здійснюється шляхом різного (послідовного або паралельного) з'єднання обмоток 7 (на рис. 1.4, а вони з'єднані паралельно). Плавне регулювання здійснюється переміщенням покажчика уставки 11 (рис. 1.4, а) по шкалі уставок 12. Покажчик уставки 11, з'єднаний із пружиною 14, при своєму русі закручує або розкручує пружину, що відповідно призведе до підйому або відпускання механічної характеристики реле.

Описане реле може працювати як на постійному, так і на змінному струмі. Для усунення вібрацій якоря, що виникають при роботі на змінному струмі, застосовується гаситель коливань 5, у якому енергія коливання переходить у роботу тертя.

1.6. Магнітні кола апаратів постійного струму

Магнітна система – це сукупність феромагнітних тіл і провідників зі струмом (або постійних магнітів), призначена для створення магнітного поля заданих конфігурації й величини в певному місці простору. Усі магнітом'які елементи магнітної системи утворюють магнітопровід, який служить для зменшення магнітного опору потоку й підведення його до того місця простору, де потік використовується. Поле магнітної системи розраховується або безпосередньо методами теорії поля (польові методи), або методами теорії кіл, що базуються на теорії поля. Поле переважної більшості магнітних систем електричних апаратів тривимірне. Розрахунки тривимірних полів польовими методами звичайно пов'язано зі значними обсягами обчислювальних робіт. Але ці розрахунки більш універсальні, дають можливість точніше розв'язати завдання, чим розрахунки за методами теорії кіл [4].

Тому в багатьох випадках їх доцільно використовувати як математичні моделі високого рівня, коли вже попередньо суттєво звужена область пошуку розмірів магнітної системи й необхідно тільки «відшліфувати» проектування.

Магнітне коло – це спрощене відображення про магнітну систему і її магнітні поля. При цьому процеси описуються з використанням таких понять, як магнітні

торушійна сила (МРС), різниця скалярних магнітних потенціалів (магнітна напруга), магнітний потік, магнітний опір. Ці поняття формально аналогічні поняттям відповідно електрорушійна сила (ЕРС), електрична напруга, струм провідності та опір електричного кола.

Аналогія між електричними й магнітними колами формальна. Наприклад, електрична провідність провідників приблизно в 10^{10} раз вище, чим в ізоляторів, тоді як магнітна проникність магнітом'яких матеріалів звичайно тільки в $10^3 \dots 10^6$ раз більше, чим у немагнітних матеріалів. Магнітні кола більшості магнітних систем ЕА містять немагнітні зазори, які не переривають магнітний потік, а тільки збільшують магнітний опір на його шляху. Ізоляційний же проміжок в електричному колі постійного струму практично перериває струм. Магнітна проникність залежить від струму (магнітного потоку), а електрична питома провідність від струму практично не залежить (без урахування нагрівання провідника). Ці відмінності роблять розрахунки магнітних кіл більш складними, чим розрахунки електричних кіл [11].

Для аналізу й розрахунків магнітних кіл постійного струму використовуються три закони: перший і другий закони Кірхгофа й закон Ома для магнітних кіл.

Перший закон Кірхгофа: алгебраїчна сума магнітних потоків Φ у вузлу магнітного кола дорівнює нулю, тобто

$$\sum \Phi = 0.$$

Потік, що входить у вузол, береться з одним знаком, а вихідний з вузла – з іншим.

Перший закон Кірхгофа для магнітного кола випливає з умови безперервності ліній магнітної індукції

$$\int B dS = 0,$$

де B – магнітна індукція; S – площа деякої замкненої поверхні.

Другий закон Кірхгофа: алгебраїчна сума магнітних напружень для будь-якого довільно обраного замкненого контуру обходу дорівнює алгебраїчній сумі МРС, що діють у цьому контурі, тобто

$$\sum U_m = \sum F,$$

де U_m – магнітна напруга на опорі ділянки контуру; F – МРС, що діє в цьому контурі.

Якщо напрямок обходу контуру збігається з дійсним або умовно прийнятим (коли воно не очевидно) позитивним напрямком магнітної напруги, то ця напруга підставляється зі знаком «+»; якщо не збігається зі знаком «-».

Позитивний напрямок магнітної напруги на магнітному опорі збігається з позитивним напрямком потоку в цьому опорі. Якщо напрямок МРС збігається з напрямком обходу, то МРС підставляється зі знаком «+»; якщо не збігається – зі знаком «-».

Якщо розраховане значення якої-небудь величини вийшло зі знаком «+», то попередньо прийнятий умовно позитивний напрямок збігається з дійсним; якщо зі знаком «-», то воно протилежно дійсному.

Другий закон Кірхгофа для магнітного кола випливає із закону повного струму

$$\int H dl = \sum I,$$

де H – напруженість магнітного поля уздовж замкненого контуру довжиною l ; $\sum I$ – алгебраїчна сума струмів, що пронизують цей контур.

Закон Ома для ділянки магнітного кола постійного струму:

$$\Phi = U_m / R_m = U_m \Lambda,$$

де R_m – магнітний опір ділянки кола; Λ – магнітна провідність цієї ділянки.

Закон Ома для магнітного кола випливає із закону повного струму. Точність розрахунків магнітної системи методами кіл у значній мірі залежить від точності визначення магнітної провідності ділянок немагнітного простору, що оточує магнітну систему.

Для довільної трубки магнітного потоку в повітрі (рис. 1.5), між кінцями якої діє магнітна напруга

$$U_m = \varphi_{m1} - \varphi_{m2}, \quad (1.1)$$

де φ_{m1} , φ_{m2} – скалярні магнітні потенціали кінців трубки.

Згідно з формулою (1.1) магнітна провідність елементарної ділянки цієї трубки площею dS і довжиною dl

$$\Delta\Lambda = \frac{BdS}{Hdl}.$$

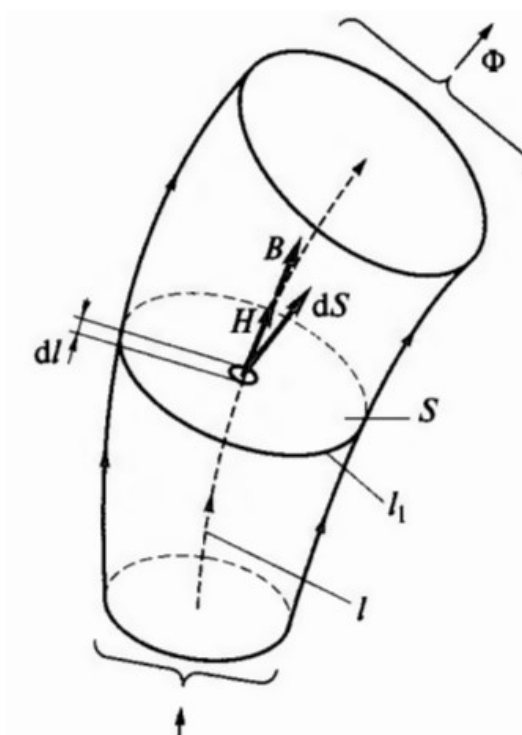


Рис. 1.5. Довільна трубка магнітного потоку

Отже, магнітна провідність усієї трубки

$$\Lambda = \frac{\int_S B dS}{\int_l H dl}.$$

Магнітний опір ділянки магнітопроводу з постійною площею поперечного перерізу S і довжиною l

$$R_m = \frac{l}{\mu S} = \frac{\rho_m l}{S},$$

де μ – відносна магнітна проникність матеріалу магнітопроводу; ρ_m – питомий магнітний опір цього матеріалу.

При використанні методів розрахунків кіл виконуються у такий спосіб:

- аналізується якісне (без кількісних характеристик, але повне по всьому просторі) розподіл поля в магнітній системі;
- реальна конфігурація поля замінюється спрощеною конфігурацією, що складається з окремих ділянок, досить просто описуваних математично; деякими

ділянками зневажають; вихрові області поля часто замінюють безвихровими, для чого об'ємний розподіл струмів приводять до розподілу у вигляді нескінченно тонкої стрічки або нитки;

- складається магнітне коло;
- знаходяться магнітні провідності (або магнітні опори) окремих ділянок поля в повітрі й інших неферомагнітних ділянках;
- здійснюється розрахунок магнітного кола з урахуванням або без нього магнітного опору магнітопроводу.

При розрахунках магнітного кола вирішується звичайно одна із двох задач: пряма або зворотна. У прямому завданні відомим є магнітний потік Φ (або магнітна індукція B) на деякій ділянці магнітної системи, а потрібно визначити МРС обмотки F . У зворотному завданні задана МРС обмотки, а потрібно визначити магнітний потік (або індукцію). Як при прямій, так і при зворотній задачі відомі всі розміри магнітної системи й матеріал магнітопроводу. У переважній більшості випадків розрахунки магнітних полів постійного струму проводяться без урахування гістерезису намагнічування.

Висновки до розділу 1.

Виконано розгляд та аналіз будови й основних вимог і параметрів ЕА, які показали, що найбільш поширеними являються електромагнітні ЕА постійного струму, що пояснюється їх добрими властивостями.

РОЗДІЛ 2. МЕТОДИ ПАРАМЕТРИЧНОЇ ОПТИМІЗАЦІЇ

2.1. Формування завдання оптимізації

Під оптимальним розуміється таке проектування, ціль якого полягає в створенні технічного об'єкта, що не тільки виконує задані функції, але й відповідає деяким заздалегідь установленим критеріям якості [11].

Пошук раціонального технічного рішення при обраному фізичному принципі дії здійснюється методом структурного синтезу. Визначення оптимальних значень параметрів елементів технічної системи відомої структури – завдання параметричного синтезу або параметричної оптимізації.

Постановка завдання оптимізації має змістовний сенс тільки в тому випадку, коли з'являється необхідність вибору одного з конкуруючих варіантів, отриманих при обмеженості ресурсів. Технічне проектування завжди ведеться в умовах твердих обмежень на матеріальні, енергетичні, часові та інші види ресурсів. Разом з тим засоби САПР дозволяють виконати розробку декількох альтернативних варіантів. Тому остаточний вибір технічного об'єкта (ухвалення рішення) необхідно проводити на підставі встановлених критеріїв. Вибір критерію є одним з важливих етапів постановки завдання оптимізації [6].

В основі побудови правила переваги лежить цільова функція, що кількісно виражає якість об'єкта й тому називається також функцією якості або критерієм оптимальності. Формування цільової функції завжди виконується з урахуванням різних вихідних параметрів пристрою проектування. Залежно від складу цих параметрів і обраного способу їх комбінації у цільовій функції якість об'єкта буде тем вище, чим більше її значення (максимізація) або чим менше її значення (мінімізація).

Проблема оптимізації має два основні аспекти:

- 1) потрібно поставити завдання, виконавши формалізацію поняття «оптимальний»;
- 2) потрібно розв'язати завдання, що вже має математичне формулювання.

Математична модель (ММ) оптимального проектування технічного об'єкта являє собою формалізований опис критерію якості, умов, які забезпечують вико-

нання заданих функцій об'єктом, вимог пропонованих до окремих параметрів об'єкта та ін.

Саме у формуванні ММ полягає постановка завдання оптимального проектування, якої передуює визначення мети й відповідного критерію оптимізації [6]. Наприклад, при проектуванні мета оптимізації може полягати в забезпеченні: його мінімальної маси; максимального ККД; мінімальних розмірів; максимальної надійності; мінімальної вартості виготовлення; мінімальної кількості матеріалу; максимальної вантажопідйомності, продуктивності та ін.

Кожної з перерахованих цілей оптимального проектування відповідає свій критерій оптимальності (маса, ККД, розміри). Критерії оптимальності виражаються цільовими функціями $f(x)$, що представляють собою математичні залежності їх значень від параметрів об'єкта проектування (ОП).

На першому етапі розробки математичної моделі оптимального проектування виявляються параметри ОП, що впливають на критерій оптимальності, і визначається вид функціональної залежності цих параметрів. Далі визначаються параметричні й функціональні обмеження, що накладаються на параметри ОП, для забезпечення їм заданих функцій.

Параметричними називаються обмеження виду:

$$x_{i'} \leq x_i \leq x_{i''},$$

де x_i – i -тий параметр технічного об'єкта; $x_{i'}$ і $x_{i''}$ – відповідно **min** і **max** припустимі значення i -го параметра.

Функціональні обмеження, що накладаються на параметри об'єктів, являють собою умови зв'язку їх значень. Ці обмеження мають вигляд:

$$g_i(x) \leq 0; g_j(x) = 0; g_k(x) < 0.$$

Функціональними обмеженнями при оптимальному проектуванні технічних об'єктів можуть бути умови: міцності; твердості; стійкості; герметичності; терміну служби. Ці умови забезпечують бажані значення тих або інших технічних характеристик і економічних показників.

Визначення обмежень є надзвичайно відповідальним етапом у процесі постановки й розв'язку завдань оптимального проектування. Неврахування яких-

небудь обмежень може призвести до таких небажаних ефектів, як передчасний вихід з ладу або низьке значення техніко-економічних показників й інших характеристик об'єкта. Разом з тим, надлишкові обмеження підвищують складність моделі, використовуваних алгоритмів і методів розв'язку завдань, а також збільшують витрати машинного часу.

При постановці завдань оптимального проектування необхідний аналіз сумісності параметричних і функціональних обмежень. При цьому, якщо виявиться, що припустимий підпростір проектування D є порожньою безліччю, то слід переглянути обмеження й виявити суперечні. Пошук оптимальних рішень можливий, якщо D містить хоча б дві точки. Таким чином, завдання оптимального проектування формулюють у такий спосіб. Знайти таке x^* , для якого $f(x^*) = \min f(x)$, за умови, що $x \in D$. Знайдене в результаті розв'язку x^* називається оптимальним розв'язком, а $f(x^*)$ – оптимальним значенням критерію оптимальності.

2.2. Класифікація критеріїв оптимізації

Основна проблема постановки завдання оптимізації – формулювання цільової функції (ЦФ). Усі вихідні параметри є функціями внутрішніх параметрів і, отже, не можуть змінюватися незалежно друг від друга. Серед них завжди можна знайти такі параметри, що поліпшення одного з них призводить до погіршення іншого. Такі параметри називаються конфліктними [6].

Якщо серед вихідних параметрів можна виділити параметр, найбільш важливий, що й найбільше повно характеризує властивості об'єкта, то його природно й прийняти за ЦФ. Це частковий критерій. У більшості часткових критеріїв у якості ЦФ приймається один з вихідних параметрів, усі інші вихідні параметри у вигляді відповідних умов працездатності відносяться до обмежень.

Однак у більшості випадків віддати перевагу одному серед якісно різнорідних величин досить важко, тому прибігають до побудови комплексного критерію, при якому ЦФ поєднує всі або більшість вихідних параметрів.

Мультиплікативні критерії. Вони можуть застосовуватися в тих випадках, коли відсутні умови працездатності типу рівності й вихідні параметри не можуть

приймати нульові значення.

Тоді ЦФ, що підлягає максимізації, має вигляд:

$$f(x) = \frac{\prod_{i=1}^m y_{maxi}(x)}{\prod_{i=1}^n y_{mini}(x)},$$

де: y_{maxi} – обмеження, при яких необхідно максимальне збільшення функції;
 y_{mini} – обмеження, при яких необхідно мінімізувати функцію.

Зручність цього критерію в тому, що не потрібно нормування.

Наприклад, до зазначених обмежень у ряді завдань відносяться: ККД, потужність; габарити, вага.

Адитивні критерії. В адитивних критеріях ЦФ утворюється шляхом додавання вихідних параметрів, перетворених до безрозмірних доданків. Це здійснюється за допомогою введення множників нормування – вагових коефіцієнтів. Нормування необхідне для об'єднання декількох вихідних параметрів, що мають у загальному випадку різну фізичну розмірність.

Тоді ЦФ має вигляд:

$$f(x) = \sum_{j=1}^n \omega_j y_j(x),$$

де ω_j – ваговий коефіцієнт, обумовлений самим інженером або групою експертів.

Статистичні критерії. Оптимізація має на меті одержання максимальної ймовірності P виконання умов працездатності. Ця ймовірність і ухвалюється у якості ЦФ. Наприклад, застосування статистичного критерію дозволяє добитися найменшого відсотка браку при серійному виробництві спроектованих виробів, тобто одержати максимальну серійну придатність, або, використовуючи статистичні дані по старінню, можна одержати об'єкти, що мають високу надійність.

Максимальні (мінімальні) критерії. Кількісна оцінка ступеня виконання j -ої умови працездатності позначається через Z_j і називається запасом працездатності параметра y_j . Розрахунки запасу по j -му вихідному параметру можна виконати різними способами, наприклад:

$$Z_j = a_j \left(\frac{T_j - y_{j\text{ном}}}{\delta_j} - 1 \right),$$

де a_j – ваговий коефіцієнт; $y_{j\text{ном}}$ – номінальне значення j -го вихідного параметра;
 δ_j – величина, що характеризує розкид j -го вихідного параметра. Рекомендується

ся $5 \leq a_j \leq 20$.

Якщо в якості ЦФ розглядається запас тільки того вихідного параметра, який у даній точці x є найгіршим з позиції виконання вимог ТЗ, тоді:

$$f(x) = \min Z_j(x), \quad 1 \leq j \leq m.$$

де m – кількість запасів працездатності.

Тому ставиться завдання про вибір такої стратегії пошуку x , яка максимізувала б мінімальний із запасів, тобто

$$\max f(x) = \max \min Z_j(x), \quad 1 \leq j \leq m, \quad x \in XD,$$

де XD – припустима для пошуку область.

Усі зазначені комплексні критерії оптимізації характеризуються суб'єктивізмом, що пояснюється неоднозначністю вибору переважаючого критерію або практично випадковістю обчислення вагових коефіцієнтів [5, 6, 7]. Найбільш об'єктивним є використання критерію максимальності (мінімальності), хоча при великій кількості критеріїв однакової функціональної поведінки можлива поява величезної помилки.

Для досягнення можливості побудови універсальної комплексної оптимізації слід використовувати комплексний пито-варіаційний критерій (КПВК) оптимізації, який повністю позбавлений суб'єктивізму й втрати інформаційної складовій другорядних критеріїв. Цей критерій оптимізації будується аналогічно адитивному критерію і являє собою суму частинних критеріїв, які масштабовані з урахуванням середнього модульного інтегрального значення (СМІЗ) і коефіцієнта активності (КА) в межах досліджуваного діапазону незалежних змінних X .

У загальному виді КПВК оптимізації

$$k(x_1 \dots x_n) = \sum_{i=1}^m k_i(x_1 \dots x_n),$$

де $k_i(x_1 \dots x_n)$ – частинний пито-варіаційний критерій; m – кількість частинних критеріїв; n – кількість незалежних змінних.

Частинний пито-варіаційний критерій (ЧПВК)

$$k_i(x_1 \dots x_n) = \frac{y_i(x_1 \dots x_n)}{y_{icp}} \cdot a_i,$$

де $y_i(x_1 \dots x_n)$ – цільова функція i -того критерію; y_{icp} , a_i – СМІЗ і КА i -тієї цільової функції в межах припустимих значень незалежних змінних, відповідно.

Амплітудне масштабування й перехід до відносних одиниць здійснюється за допомогою першої складової частки критерію СМІЗ, яке являє собою сукупне по модулю охоплене функцією частинного критерію простору (площі) щодо простору (осі) незалежних змінних, співвіднесене до заданого простору (відрізку) незалежних змінних.

У загальному виді СМІЗ i -тієї цільової функції в межах припустимих значень незалежних змінних

$$y_{icp} = \frac{\int_{x_{n \min}}^{x_{n \max}} \dots \int_{x_{1 \min}}^{x_{1 \max}} |y_i(x_1 \dots x_n)| dx_1 \dots dx_n}{\prod_{j=1}^n |x_{j \max} - x_{j \min}|},$$

де $x_{j \max}$, $x_{j \min}$ – максимально й мінімально припустимі значення j -тієї незалежної змінної, відповідно.

Застосування модуля інтеграла в СМІЗ пояснюється необхідністю усунення нульового значення СМІЗ при дослідженні симетричних щодо простору (осі) незалежних змінних функцій частинного критерію, тому що це може призвести до неможливості обчислення приватного критерію.

Другою складовою частки критерію є КА, який показує: наскільки сильно змінюється функція в межах дослідного діапазону. Слабко мінливі або практично постійні функції частинних критеріїв повинні мати менший пріоритет при оптимізації, що реалізується завдяки застосуванню КА.

КА i -тієї цільової функції в межах припустимих значень незалежних змінних

$$a_i = \sum_{j=1}^n \frac{\left(\left| \max \left(\frac{\partial y_i(x_1 \dots x_n)}{\partial x_j} \right) \right| + \left| \min \left(\frac{\partial y_i(x_1 \dots x_n)}{\partial x_j} \right) \right| \right)}{2 \int_{x_{j \min}}^{x_{j \max}} \left| \frac{\partial y_i(x_1 \dots x_n)}{\partial x_j} + \varepsilon \right| dx_j} \cdot |x_{j \max} - x_{j \min}|,$$

де ε – значення зсуву частинної похідній частинного критерію.

Фактично КА являє собою алгебраїчну суму середніх арифметичних модулів максимального й мінімального значень часток похідних частки критерію у межі дослідної ділянки незалежних змінних, які масштабовані за допомогою середніх зміщених модульних інтегральних значень часток похідних частинного критерію.

Зсув на величину ε інтегрального значення частинної похідній необхідно для запобігання поділу на нуль при тотожно рівної нулю часткової похідної. Значення ε повинне бути менше припустимої погрішності, для кожної незалежної змінної можна приймати своє значення зсуву, але раціонально прийняти всі зсуви однаковими на рівні мінімальної припустимої погрішності відповідного аргументу функції приватного критерію.

Слід зазначити, що СМІЗ і КА завжди є позитивними числами, що призводить до відповідності знаків функцій критерію оптимізації й ЧПВК.

Зазначений критерій оптимізації повинен працювати при будь-яких умовах і при будь-якому виді функції частинного критерію. Для перевірки цього необхідно розглянути набір найбільш типових функцій і оперування ними за допомогою ЧПВК, як основної складової КПВК.

Більше того, при слабоактивних функціях критерію оптимізації, коли оптимум розмазаний у межах припустимої погрішності на великій ділянці, переважно мати обмеження у вигляді бажаної області, яку можна ідентифікувати за допомогою опорної точки. Її слід вибирати з погляду технологічного процесу виготовлення [6], ергономіки об'єкта проектування та ін., тобто деяких властивостей які не закладені в ЦФ критеріїв оптимізації.

Опорна точка може перебувати як усередині області припустимих значень, так і на її границі. Слід використовувати в такому випадку наступне її математичне позначення:

$$- \text{для внутрішньої точки } x \in \left(x_{\min} \dots \overset{\downarrow}{x_6} \dots x_{\max} \right);$$

– для зовнішньої точки $x \in \left(\overset{\downarrow}{x_{\min}}, x_{\max} \right)$ або $x \in \left(x_{\min}, \overset{\downarrow}{x_{\max}} \right)$.

Таким чином, можна зробити висновки, що КПВК є об'єктивним і не спотворює виду цільової функції частинного критерію.

2.3. Методи оптимізації

Завдання оптимізаційного проектування технічних об'єктів у деяких випадках можна сформулювати як завдання безумовної оптимізації (без обмежень), але найбільш типовими є умови оптимізації, що надає умову цільової функції при наявності обмежень [6].

Залежно від діапазону дослідження розрізняються методи локальної й глобальної оптимізації, які можуть і не збігатися.

Залежно від порядку використовуваних похідних цільової функції по незалежних параметрах методи оптимізації діляться на методи нульового, першого й другого порядків. У методах нульового порядку (прямих методах) інформація про похідні не використовується. Для методів першого порядку необхідно обчислювати як значення функції якості, так і її перші часткові похідні (градієнтні методи). У методах другого порядку організація пошуку екстремуму ведеться з урахуванням значень цільової функції, її перших і других похідних.

Залежно від кількості керованих параметрів ЦФ розрізняються методи одномірної й багатомірної пошуку. Залежно від виду ММ при розв'язку завдань оптимального проектування можна використовувати наступні методи: дослідження функцій класичного аналізу; метод множників Лагранжа; варіаційне обчислення; принцип максимуму Понтрягіна; динамічне програмування; лінійне програмування; нелінійне програмування; методи випадкового пошуку й ін.

Усі градієнтні методи використовують особливості поведінки градієнта, які полягають у тому, що градієнт завжди ортогональний до гіперповерхні цільової функції в точці його визначення й цей напрямок збігається з локальним напрямком найшвидшого зростання цільової функції. Спосіб вибору кроку, напрямку пошуку або того й іншого одночасно визначають сутність методу. Особливістю

методу найшвидшого спуска є рух з оптимальним кроком, розрахованим за допомогою одномірної мінімізації цільової функції по кроку уздовж антиградієнтного напрямку. Дійсно, якщо в який-або точці x напрямок пошуку визначений, то цільова функція може вважатися функцією змінного параметра кроку, що характеризує положення нової точки на x заданої прямій. Тому алгоритм методу найшвидшого спуска містить наступні етапи.

1. Обчислення часткових похідних цільової функції за незалежними змінними у вихідній або проміжній точці.
2. Знаходження одним з методів одномірного пошуку оптимального антиградієнтного напрямку.
3. Обчислення координат нової точки x .

Рух припиняється уздовж одного напрямку, коли лінія напрямку пошуку стає дотичною до якої-або лінії рівного рівня. Кожний напрямок руху до екстремуму ортогональний попередньому, якщо ЦФ квадратична.

На відміну від градієнтних, методи пошукової оптимізації добре програмується й вимагають менших витрат машинного часу. Для них характерний вибір напрямку пошуку оптимуму за результатами послідовних обчислень ЦФ. По способу точки випробувань ЦФ пошукові методи оптимізації діляться на детерміновані методи пошуку й методи випадкового пошуку. У детермінованих методах перехід з попередньої точки в наступну відбувається відповідно до деякого алгоритму, що визначає той або інший метод. У методах випадкового пошуку в цей процес вноситься деякий елемент випадковості.

Детермінований метод Вуда. Метод по черзі реалізує дві стратегії пошуку: «пошук, що досліджує» і «пошук за зразком». Спочатку задаються вихідними значеннями елементів x , а також елементів вектору збільшень Δx . «Пошук» полягає в наступному, циклічно за кожної змінної x обчислюються значення цільової функції для $x_i + \Delta x_i$ і $x_i - \Delta x_i$, залишаючи при цьому інші змінні незмінними. Якщо виявиться, що значення ЦФ поліпшується при зміні x на величину $\pm \Delta x_i$, то нове значення фіксованої змінної приймається рівним $x_i + \Delta x_i$ або $x_i - \Delta x_i$. Аналогічні дії виконуються і для інших змінних.

Після проведення одного (або більш) «пошуку» переходять до стратегії «пошуку за зразком», що полягає в наступному. У напрямку вектору, обумовленого змінами змінних, які поліпшують значення цільової функції, робляться кілька прискорюваних кроків доти, поки значення ЦФ продовжує зменшуватися. Довжина кроку при «пошуку за зразком» для прискорення збільшується пропорційно числу вдалих кроків введенням деякого множника. Якщо «пошук за зразком» після серії вдалих кроків перестає поліпшувати значення цільової функції, то вертаються до стратегії «пошуку».

Описаний пошук припиняється при виконанні одного з наступних трьох умов:

- 1) ЦФ досягає деякого заздалегідь встановленого значення;
- 2) значення ЦФ виявляються менше заздалегідь певних чисел (у завданні мінімізації);
- 3) різниця між останнім і попереднім значеннями ЦФ не перевищують деякого заздалегідь встановленого рівня.

Ідея методів випадкового пошуку полягає в тому, щоб перебором сукупностей випадкових значень керованих параметрів знайти оптимальне значення ЦФ. На відміну від детермінованих методів, у методах випадкового пошуку напрямку пошуку вибираються випадковими на основі генерації в ЕОМ псевдовипадкових чисел за допомогою спеціальних програм.

Серед багатьох різновидів методів випадкового пошуку найпростішим буде сліпий пошук (метод Монте-Карло). На $(k + 1)$ -м кроці пошуку вибирається випадкова точка із припустимої області, обчислюється значення x_{k+1} і порівнюється зі значенням, отриманим на попередньому кроці. Якщо $f(x_{k+1}) < f(x_k)$, то запам'ятовуються координати точки й нове значення ЦФ, інакше робиться спроба досягти успіху або змінюючи напрямок на протилежний, або вибираючи новий випадковий напрямок.

Відсутність універсального методу оптимізації послужила причиною появи безлічі вузькоспеціалізованих методів, пристосованих до розв'язку окремих завдань.

Параметри, що надають можливість отримати екстремум цільової функції при виконанні обмежень, знаходяться за допомогою якого-небудь методу обчислювальної математики. Ці методи розділяються на дві більші групи:

- 1) аналітичні методи (пряме дослідження цільової функції на екстремум, метод множників Лагранжа, метод варіаційного обчислення);
- 2) чисельні методи, коли оптимальні параметри визначаються за допомогою деякої ітераційної процедури (послідовними наближеннями).

Через складність цільових функцій і обмежень в інженерних завданнях оптимізації найбільше застосування знаходять чисельні методи. Серед них слід виділити методи:

- а) нелінійного програмування, розроблені для нелінійних цільових функцій при лінійних і (або) нелінійних обмеженнях;
- б) лінійного програмування, розроблені для лінійних цільових функцій при лінійних обмеженнях.

Слово «програмування» у цих визначеннях не означає «складання обчислювальних програм».

Застосування лінійного програмування виявилось плідним у різних завданнях оптимального керування нединамічними системами (оптимальне розміщення встаткування, організація транспортних потоків та ін.).

Методи дослідження функції класичного аналізу найбільш відомі для розв'язку нескладних оптимальних завдань. Звичайно областю їх використання є завдання з відомим аналітичним вираженням критерію оптимальності R і аналітичним вираженням, як для похідних виду dr/dX , так і часткових похідних безперервної функції багатьох змінних $R = R(x_1, x_2, \dots, x_n)$. Екстремальні розв'язки оптимального завдання, у край рідкісне вдається отримати аналітичним шляхом, у зв'язку із чим застосовуються обчислювальні машини.

Розв'язок завдання оптимізації суттєво ускладняється, коли критерій оптимальності є функцією декількох незалежних змінних, навіть при відомому аналітичному вираженні цієї функції. Найбільші ж труднощі виникають при відсутності безперервності у всіх або деяких похідній функції оптимізації. В останньому

випадку для розв'язку оптимального завдання доцільно використовувати методи нелінійного програмування.

Метод множників Лагранжа застосовується для розв'язку завдань такого ж класу складності, як і у звичайних методах дослідження функцій, але при наявності обмежень типу рівності на незалежні змінні [7].

Методи можна застосовувати для розв'язку завдань оптимізації об'єктів з розподіленими параметрами й завдань динамічної оптимізації. Тут замість розв'язку системи кінцевих рівнянь для відшукування оптимуму необхідно інтегрувати систему диференціальних рівнянь. Множники Лагранжа використовуються так само в якості допоміжного засобу при розв'язку завдань із обмеженням типу рівності у варіаційному обчисленні й динамічному програмуванні. Слід особливо підкреслити, що метод множника Лагранжа дозволяє знайти лише необхідні умови існування умовного екстремуму для безперервних функцій, що мають до того ж безперервні похідні. Отримані в результаті розв'язку значення невідомих X_i повинні бути перевірені на екстремум за допомогою аналізу похідних більш високого порядку або іншими методами.

Методи варіаційного обчислення. Оптимальні завдання, коли розв'язок представляється не як сукупність значення кінцевого числа змінних, а як сукупність функції, вид яких заздалегідь не відомий, становлять сутність варіаційного обчислення. Варіаційне обчислення застосовується для оптимізації математично описаних процесів.

При статистичній оптимізації процесів з розподіленими параметрами або в задачах динамічних оптимізації варіаційні методи дозволяють звести розв'язок оптимального завдання до інтегрування системи диференціальних рівнянь Ейлера.

Методи детермінованого й випадкового пошуку. Відмінність зазначених методів (рис. 2.1) полягає у визначенні стратегії пошуку спрямованого руху в n -мірному просторі до оптимуму.

За цією ознакою їх можна класифікувати на методи пасивного й спря-

мованого пошуку.



Рис. 2.1. Прямі методи розв'язку оптимальних завдань

Останні, у свою чергу, діляться на одноетапні (gradientні, випадкового пошуку) і багатоетапні (метод почергової зміни змінних).

В основу gradientних методів пошуку покладені обчислення й аналіз похідних цільової функції $R(x)$. Якщо залежність $R(x)$ не можна записати у явному або аналітичному виді, то єдиним способом визначення похідних $R(x)$ є застосування

чисельного методу.

У методі градієнта використовується градієнт цільової функції. І оскільки напрямок градієнта в кожній точці збігається з напрямком найшвидшої зміни цільової функції, то локально найкращим є градієнтний напрямок при максимізації або антиградієнтний – при мінімізації. Пошук оптимуму проводиться у два етапи. На першому етапі визначаються значення часткових похідних по всіх незалежних напрямках, які визначають напрямок градієнта в розглянутій точці. На другому етапі здійснюється крок в обраному напрямку. При виконанні кроку одночасно змінюються значення всіх незалежних змінних, кожна з них одержує збільшення, пропорційне відповідному градієнту по даній осі. У методі градієнта важливим завданням є вибір стратегії зміни кроку. Оскільки після кожного кроку доводиться знаходити похідні цільової функції за n незалежними змінними, при занадто малому кроку рух до оптимуму буде довгим через необхідність розрахунків цільової функції в дуже багатьох точках. Напроти, якщо обраний крок занадто більший, то в районі оптимуму може виникнути «нишпорення», яке не загасне, або загасне дуже повільно. Доцільно тому застосовувати алгоритм градієнтного пошуку, у якому величина кроку міняється автоматично відповідно до зміни абсолютної величини градієнта.

Перевагою цього алгоритму є можливість збільшення й зменшення кроку в процесі пошуку. Момент закінчення пошуку визначається по виконанню попередньо заданих умов знаходження цільової функції в околиці екстремальної точки (рис. 2.2).

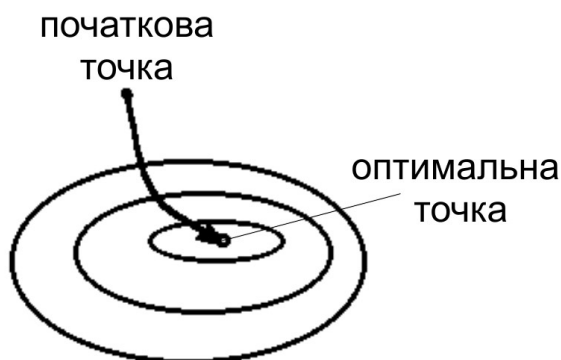


Рис. 2.2. Характер руху до оптимуму методом градієнта з малим кроком

Метод релаксації полягає у відшукуванні осьового напрямку, уздовж якого цільова функція змінюється найбільш швидко. Осьовому напрямку відповідає найбільша по модулю похідна. У випадку мінімізації рух збігається з напрямком осі (знак похідної негативний) і кроки робляться доти, поки не буде отримано мінімальне значення по обраному осьовому напрямкові. Після чого знову визначаються похідні за всіма змінними за винятком тієї, по якій здійснювався спуск, і знову вибирається осьовий напрямок якнайшвидшого убуття цільової функції, по якому проводяться подальші кроки. Критерієм закінчення пошуку оптимуму є досягнення такої точки, з якої по будь-якому осьовому напрямкові подальшого убуття цільової функції не відбувається (рис. 2.3). Хоча метод релаксації має певні переваги перед методом градієнта, оскільки при спуску уздовж обраного осьового напрямку не потрібно обчислення похідних, однак рух відбувається все-таки не в оптимальному напрямку, тому що градієнт у цьому випадку не збігається з осьовим напрямком.

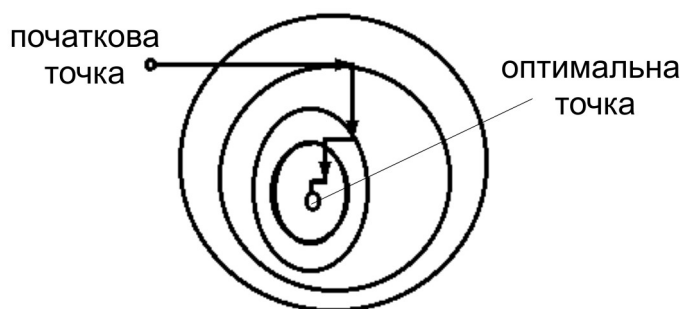


Рис. 2.3. Характер руху до оптимуму в методі релаксації

У методі найшвидшого спуска знайшла комбінація основних ідей і методів релаксації й градієнта. Суть методу полягає в тому, що після визначення в початковій точці градієнта цільової функції напрямок руху пошуку зберігається незмінним доти, поки в цьому напрямку не буде знайдений мінімум. Після чого обчислюється градієнт і визначається новий напрямок пошуку. Даний метод є більш вигідним через скорочення обсягу обчислення, особливо вдалині від оптимуму. Поблизу оптимуму напрямок градієнта міняється різко, тому зазначений метод автоматично переходить у метод градієнта. Важливою особливістю найшвидшого спуска (рис. 2.4) є те, що при його застосуванні кожний новий напрямок руху до

оптимуму ортогональний попередньому.

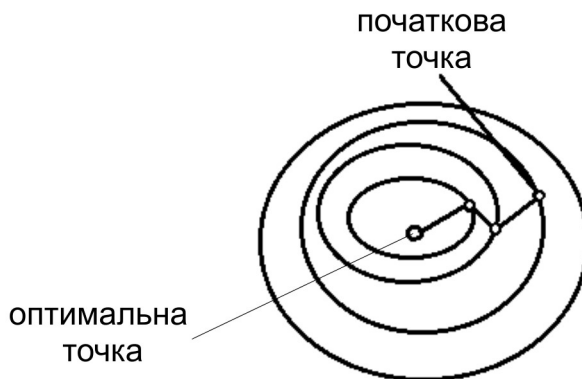


Рис. 2.4. Характер руху до оптимуму методом найшвидшого спуска

Це пояснюється тим, що рух в одному напрямку проводиться доти, поки воно не виявиться дотичним до лінії постійного рівня.

Метод «важкої кульки» на відміну від раніше розглянутих може бути використаний у завданнях із цільовими функціями, що мають декілька локальних екстремумів і характеризується в цьому аспекті як метод пошуку глобального екстремуму.

До недоліків градієнтних методів слід віднести те, що для визначення напрямку руху потрібно обчислити значення похідної від функції по кожному параметру.

Обчислення похідних може бути неточним через різноманітність параметрів, по яких виконується оптимізація. Тому всі параметри приводяться до безрозмірного виду. Поверхня пошуку може виявитися такою, що прийдеться часто змінювати напрямки руху, а це призводить до значних витрат часу при звертанні до математичної моделі.

Безградієнтні методи детермінованого пошуку використовують у процесі пошуку інформацію, одержувану не при аналізі похідних, а від порівняння величини критерію оптимальності у результаті виконання чергового кроку.

Деякі із цих методів доцільно застосовувати в комбінації із градієнтними методами, що являється іноді досить ефективним для алгоритмів розв'язку завдань нелінійного програмування. Безградієнтні методи, крім того,

по характеру найбільш придатні для оптимізації діючих промислових і лабораторних установок при відсутності математичного опису об'єкта оптимізації.

У розглянутих методах застосовуються одномірний і багатомірний пошук. Одномірний пошук екстремуму функції однієї змінної часто використовуються не тільки як самостійний метод оптимізації, але і як допоміжний (наприклад, при спуску по напрямкові) у багатомірних методах оптимізації. Число методів одномірного пошуку відносяться:

- 1) метод локалізації функції однієї змінної;
- 2) метод золотого перетину.

Сутність цих методів полягає у визначенні інтервалу, де перебуває екстремум однієї змінної. Точність методу «золотого перетину» (рис. 2.5) на порядок вище. Якщо завдання полягає у визначенні положення екстремуму функції однієї змінної на інтервалі $[A, B]$, тоді «золотим перетином» Z називається розподіл відрізка на дві частини таким чином, щоб відношення довжини меншого відрізка AC до довжини всього інтервалу AB було рівне 0,38. При використанні цього методу є можливість за допомогою одного обчислення на кожному етапі локалізувати положення екстремуму. На рис. 2.5 цьому відповідає співвідношення $AC / AB = BD / CB = 0,38$.

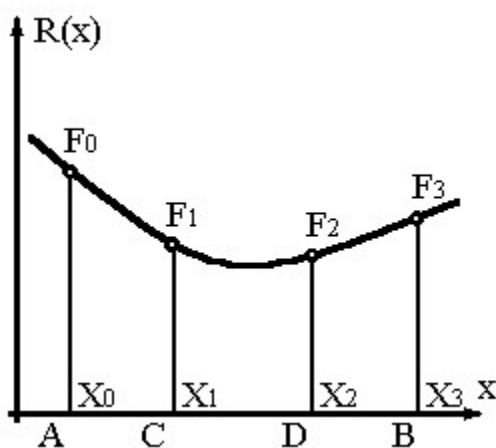


Рис. 2.5. Одномірний пошук методом «золотого перетину»

Метод почергової зміни змінних, називаний також методом Гауса-Зейделя, відноситься до методів багатоетапного спрямованого пошуку й по суті аналогічний методу релаксації. Відмінність у тому, що не визначається новий напрямок за

допомогою похідних, а по черзі змінюються незалежні змінні, щоб по кожній з них досягалося екстремальне значення цільової функції. Стратегія пошуку мінімуму по кожній змінній може бути будь-яка, доцільно використовувати тут і методи пошуку екстремізму функції однієї змінної. Простота й порівняно невеликий обсяг обчислень, необхідних для його реалізації, обумовили його поширення в системах автоматичного пошуку оптимуму цільової функції.

Якщо потрібно знайти мінімум функції трьох змінних A, B, C , тоді кожна змінна визначена на інтервалах: $[A1, A2], [B1, B2], [C1, C2]$. Методом «золотого перетину» здійснюється по черзі мінімізація цільової функції за кожної змінної, які приймуть відповідно значення $AM1, BM1, CM1$. Одержавши перший наближений мінімум, повторюється пошук по кожній змінній i , якщо координати точки мінімуму цільової функції не змінилися, то пошук закінчується. У якості критерію мінімізації прийнята поліпшена квадратична оцінка з тих міркувань, що на відміну від звичайних інтегральних оцінок у ній накладаються обмеження не тільки на величину відхилення x , але також і на швидкість відхилення $\dot{x}$.

Поліпшена квадратична інтегральна оцінка має вигляд

$$I_k = \int_0^{\infty} (x^2 + T\dot{x}^2) dt,$$

де T – деяка постійна часу.

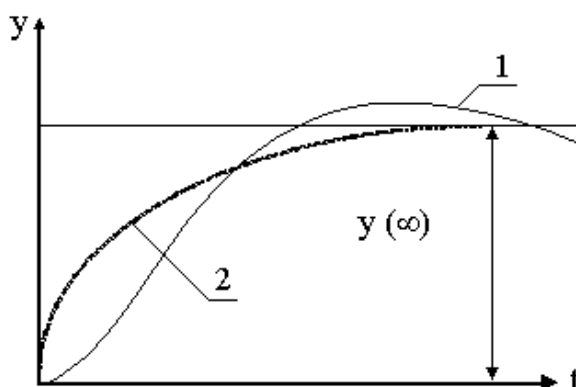


Рис. 2.6. До метода поліпшеної квадратичної оцінки

1 – реальний перехідний процес; 2 – оптимальний перехідний процес

Мінімізація цільової функції за I_k дозволяє наблизити перехідний про-

цес до експоненти (рис. 2.6) із заданою постійною часу T , яка зветься екстремалі. Вибір параметрів системи по заданій оцінці призводить до меншої коливань перехідних процесів у порівнянні зі звичайною квадратичною інтегральною оцінкою. При багатомірному пошуку за методом Гауса-Зейделя виконується порівняння координат MIN1 і MIN2 по кожній змінній. Якщо це відхилення менше або дорівнює кроку пошуку по кожній змінній, то пошук закінчується з виводом значень координат і цільової функції. А якщо ні, то процес оптимізації повторюється. Цільова функція обчислюється в процесі розрахунків перехідного процесу. За один такт квантування за часом обчислюється помилка (відхилення) і її похідна. Відхилення перебуває як різниця між значенням, що встановилося, яке визначається шляхом розподілу вільних членів чисельника й знаменника передатної функції, і розрахованим на даному кроці значенням перехідного процесу, як це показано на рис. 2.7.

Значення інтегральної оцінки на кожному кроці розрахунків визначається по формулі

$$I_k = T \cdot S^2 + \tau \cdot T \cdot S^2,$$

де $\tau = 0,618$.

Величина інтегральної оцінки за весь перехідний процесу визначається як

$$I = \sum_{k=1}^N I_k,$$

де N – кількість кроків розрахунків перехідного процесу.

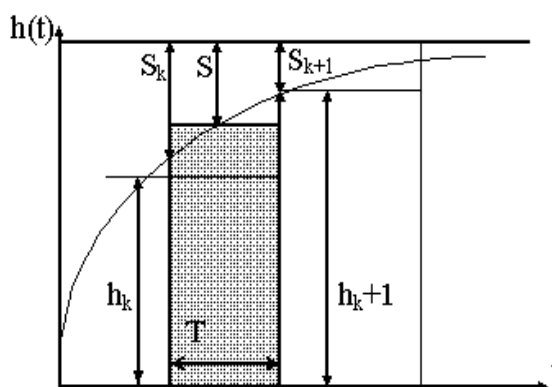


Рис. 2.7. Розрахунок поліпшеної квадратичної інтегральної оцінки

h_k – значення вихідної величини на попередньому кроці перехідного процесу;

h_{k+1} – то же на даному кроці перехідного процесу;

S_k, S_{k+1} – відхилення від сталого значення; S – середнє значення відхилення;

$S = (S_{k+1} - S_k) / T$ – похідна за відхиленням, де T – екстремаль.

У завершення аналізу прямих методів розв'язку оптимальних завдань слід запинитися на групі методів випадкового пошуку. Основна ідея цих методів, полягає в тому, щоб перебором випадкових сукупностей значень незалежних змінних знайти оптимум цільової функції або напрямку руху до нього. Загальним для всіх методів випадкового пошуку є застосування випадкових чисел у процесі пошуку, вони відносяться до одноетапних методів спрямованого пошуку.

При використанні сліпого пошуку в припустимій області зміни незалежних змінних випадковим образом вибирається точка, у якій обчислюється значення цільової функції. Далі аналогічно вибирається інша точка, де також розраховується функція мети й рівняється з отриманим раніше. Якщо нове значення функції мети виявляється менше (більше) попереднього, то це значення запам'ятовується разом з координатами точки, де воно було обчислено. Потім триває вибірка випадкових точок і порівняння значень критерію оптимальності в цих точках із уже знайденими точками. Щораз, коли виходить менше значення цільової функції, воно запам'ятовується разом з відповідними координатами, після чого триває пошук кращого наближення до оптимуму.

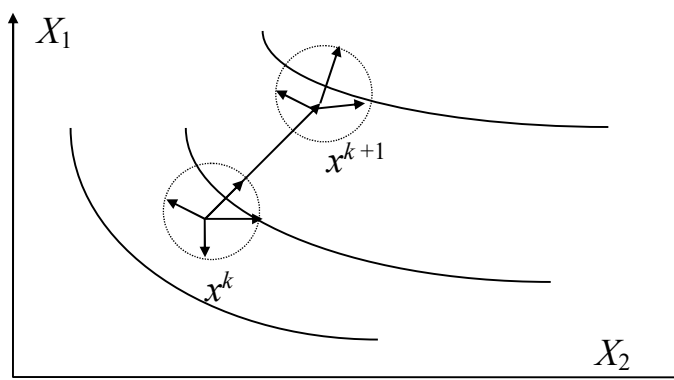


Рис. 2.8. Метод випадкових напрямків

Відповідно до методу випадкових напрямків з деякої точки x^k у просторі параметрів робиться кілька пробних кроків у випадкових напрямках (рис. 2.8). Для практичних розрахунків число кроків у серії часто приймається рівним розмірності розв'язуваного завдання m , збільшення цільової

функції, порівнюються один з одним і визначається напрям, у якому це поліпшення виявилось найбільшим. При цьому координати нової точки в просторі параметрів визначається по формулі

$$x_i^{k+1} = x_i^k + \delta_{x_i} \cdot \frac{h}{\delta},$$

де δ_{x_i} – проекція найбільш удалого пробного кроку на вісь X_i ; h – величина робочого кроку; δ – значення пробного кроку.

Критерієм закінчення пошуку служить мінімальний розмір кроку $h_{\min}$, яким і задається точність визначення оптимуму.

Метод випадкових напрямків зі зворотним кроком являє собою поліпшення алгоритму, описаного вище. Відмітною його особливістю є те, що при невдалому кроці із точки x^k відразу проводиться крок у зворотному напрямку. При достатньому видаленні від оптимуму така стратегія виявляється досить ефективною. Якщо й зворотний крок виявився невдалим, то можна або зробити новий випадковий крок із точки x^k , або перейти до пошуку зі зменшеним розміром кроку із цієї точки.

Метод випадкових напрямків з лінійним перерахуванням може використовуватися, якщо кривизна функції оптимізації відносно не висока й у межах одного кроку пошуку зміну цільової функції можна апроксимувати лінійною формою.

Метод спуска «з покаранням випадковістю» по суті являє собою аналог методу найшвидшого спуска з тою лише різницею, що напрямок спуска вибирається випадковим образом. Зазначений метод доцільно використовувати тоді, коли для знаходження значень цільової функції не потрібно більших обчислювальних витрат.

Метод сканування (упорядкованого перебору). Відповідно до цього методу здійснюється послідовний перегляд усіх вузлів m -мірних сіток у заданій області зміни параметрів оптимізації, яка визначається умовами:

$$X_{i \min} \leq X_i \leq X_{i \max}, \text{ де } i = 1, \dots, m.$$

При цьому діапазони зміни внутрішніх параметрів розбиваються на деяку встановлювану проектувальником кількість відрізків N_j найчастіше з рівномірним

кроком h_{x_i} .

$$h_{x_i} = \frac{x_{i \max} - x_{i \min}}{N_j}.$$

Приклад побудови сітки в просторі двох параметрів показано на рис. 2.9. У всіх вузлах сітки крім тих, у яких не виконуються обмеження, визначаються значення функції й шляхом порівняння вибирається вузол із кращим значенням цільової функції $F(x)$. Алгоритм, що реалізує метод сканування, може бути побудований як сукупність вкладених друг у друга циклів, загальним для яких є ділянка з розрахунку й перевірки обмежень і функції. Кількість таких циклів дорівнює числу параметрів оптимізації m .

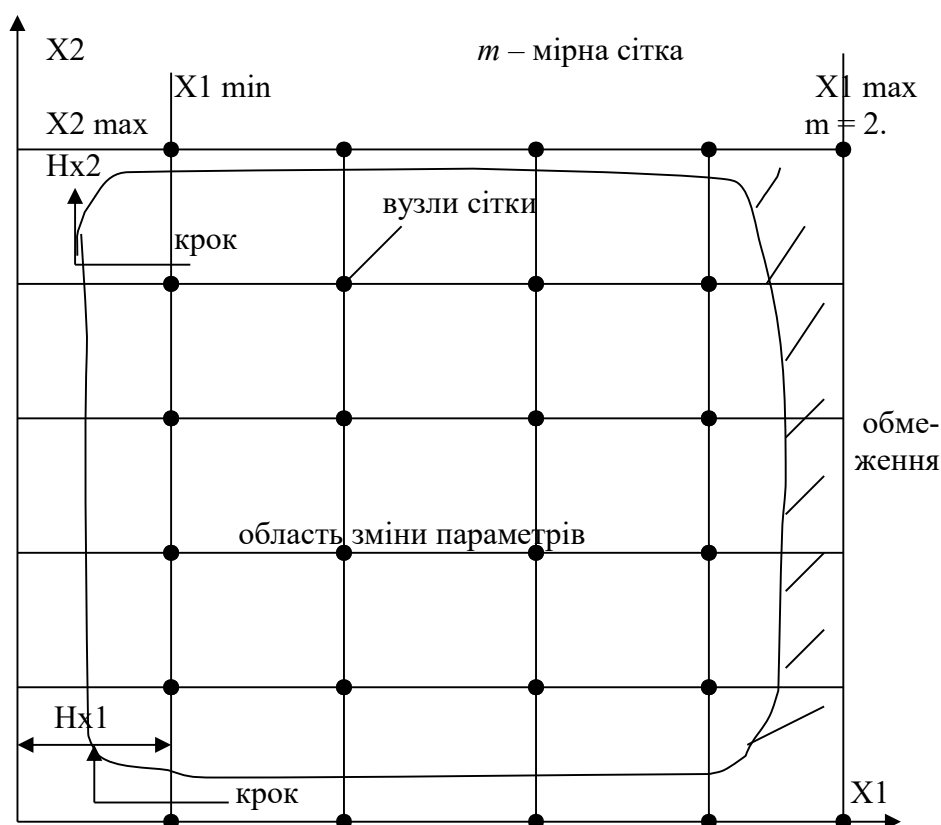


Рис. 2.9. Приклад побудови двомірної сітки по методу сканування

Кількість звертань до моделі N_p

$$N_p = \prod_{i=1}^m N_j,$$

де N_j – кількість відрізків.

При $N_j = 100$ для $m = 2$ $N_p = 100 \cdot 100 = 10^4$.

Закінчення пошуку – перегляд усіх N_p точок і вибір найбільшого значення цільової функції $F(x)$.

Метод випробувань (метод випадкового перебору або метод Монте-Карло) у практичній постановці зводиться до багаторазового «розігрування» випадкових значень X_i і визначення для кожного випадкового їх набору відповідних значень $F(x)$. По завершенню необхідного числа випробувань $N_{тр}$ проводиться статистична обробка випадкових значень $F(x)$, що дозволяє визначити математичний опис $M(F_x)$, імовірнісні границі розбіжності $F(x)_{\min} \dots F(x)_{\max}$ та ін.

Число вхідних параметрів і вихідних показників не обмежується й зв'язане практично лише з невеликими додатковими витратами на виробіток випадкових значень x_i і обробку результатів.

Визначається мінімальне число випробувань $N_{тр}$, необхідні для побудови необхідних розподілів із заданою точністю Δ і ймовірністю P_B її забезпечення.

У практичних розрахунках мова йде звичайно про виконання $(3 \dots 5) \cdot 10^3$ варіантів розрахунків.

Знаходження кількості випадкових чисел перегляду при оптимізації по методу Монте-Карло можна визначити по формулі:

$$N_{тр} = \frac{\lg(1 - P_B)}{\lg(1 - \Delta)},$$

де Δ – точність наближення до точки умовного екстремуму.

$$\Delta = \prod_{i=1}^m \left(\frac{h_{x_i}}{x_{i \max} - x_{i \min}} \right).$$

Умовою закінчення пошуку є перегляд необхідного числа точок $N_{тр}$.

Оскільки пошукові методи припускають покроковий, ітеративний розв'язок завдання, то обсяг обчислень характеризує витрати часу на пошук. Основний обсяг обчислень становить розрахунки значень обмежень до цільової функції, проведені за допомогою математичної моделі об'єкта проектування. Вони й визначають основні витрати часу на пошук, тому витрати ці прийняти як універсальна характеристика розглянутих методів оптимізації.

Якщо при $m = 3$ ще методи пасивного пошуку працюють, то вже при $m = 5$

методами пасивного пошуку не вдається одержати розв'язок на ЕОМ за прийнятний час, у той же час метод градієнта має невелику кількість звертань до моделі порядку.

Необхідно ще відзначити, що метод випадкових напрямків (випадкового градієнта) практично не залежить від розмірності області пошуку й метод виявиться більш ефективним, чим градієнтний метод у випадку росту числа параметрів m . Меншою ефективністю з методів напрямку пошуку має метод Гауса-Зейделя, однак уже при $m > 3$ цей метод дозволяє одержувати розв'язок за прийнятний час при дискретно мінливих параметрах. Таким чином, різні методи пошуку мають певні сфери дії в задачах оптимізації проектних рішень.

Висновки до розділу 2.

Виконано розгляд та аналіз методів параметричної оптимізації та їх критеріїв, які показали, що в якості математичних інструментів визначення найкращого співвідношення параметрів електромагнітних електричних апаратів за техніко-економічними показниками слід застосовувати класичні методи, як більш об'єктивні, а в якості комплексного критерію доцільно застосувати питомо-варіаційний критерій.

РОЗДІЛ 3. АЛГОРИТМ ОПТИМІЗАЦІЇ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ЕЛЕКТРИЧНОГО АПАРАТА

3.1. Постановка завдання оптимізації

Розвиток СЕП та якісних вимог до них породжує необхідність удосконалення комутаційних і захисних ЕА. Більшість із яких має електромагнітний привод. Тому їх оптимізація є актуальним питанням.

Існує безліч підходів до розв'язку оптимізації електромагнітів електричних апаратів:

- у роботі [16] оптимізація зводиться до одержання мінімуму сердечника, але він визначається заданою силою тяги, що робить запропонований алгоритм суб'єктивним;
- у роботі [15] досліджується залежність між діаметром сердечника й силою тяги, але для конкретного апарата сила тяги є вихідним параметром;
- найбільш об'єктивним підходом для оптимізації роботи електромагнітної частини є робота [5], але форма елементів в ній не охоплює всі вимоги до сучасних апаратів.

Основна ціль досліджень – виконати оптимізацію електромагніту електричного апарата з метою підвищення технічних показників.

За методологічну основу досліджень прийнятий підхід до оптимізації на основі комплексного питомо-варіаційного критерію [6], як найбільш універсального й об'єктивного.

В якості частинних критеріїв прийняті: маса активної частини, втрати потужності в обмотці й постійна часу обмотки. Така сукупність критеріїв максимально повно дозволяє охопити всі вимоги до електричних апаратів: вартість, експлуатаційні витрати, швидкодія та ін.

Вихідними даними для виконання оптимізації є: коефіцієнт заповнення вікна електромагніту k_z ; максимальний повітряний зазор якоря δ (рис. 3.1); максимальна щільність струму Δ ; індукція в повітряному зазорі B_δ ; напруга живлення обмотки U ; необхідна мінімальна сила тяги електромагніту F_T .

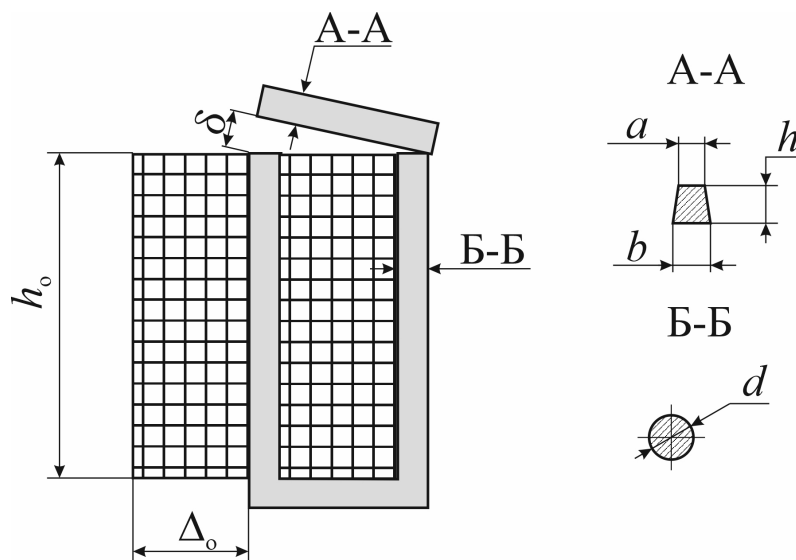


Рис. 3.1. Основні розміри електромагніту

Магнітопровід має круглу форму перетину для стрижнів, де розташовується обмотка, і трапецієподібну для якорю (рис. 3.1), що дозволяє наблизити геометрію електромагніту до оптимального рішення.

3.2. Оптимізація за масою активної частини

Діаметр стрижня магнітопроводу електромагніту (рис. 3.1), м

$$d = \frac{4\sqrt{2\mu_0 F_T}}{\pi B_\delta}.$$

МРС обмотки електромагніту, А

$$F = \frac{B_\delta \delta}{\mu_0}.$$

Для побудови цільових функцій в якості незалежної змінної, як у [5], використовується ширина обмотки Δ_o (рис. 3.1).

Висота обмотки електромагніту (рис. 3.1), м

$$h_0(\Delta_o) = \frac{F}{k_z \Delta \Delta_o}.$$

Маса обмотки електромагніту, кг

$$m_m(\Delta_o) = \frac{\pi F \rho_m}{\Delta} (d + \Delta_o),$$

де ρ_m – щільність міді, кг/м³.

Маса магнітопроводу електромагніту, кг

$$m_c(\Delta_o) = \frac{\pi}{2} d^2 \rho_c (2d + \Delta_o + h_0(\Delta_o)),$$

де ρ_c – щільність матеріалу магнітопроводу електромагніту, кг/м³.

Маса активної частини електромагніту, кг

$$m(\Delta_o) = m_m(\Delta_o) + m_c(\Delta_o). \quad (3.1)$$

Вираз (3.1) визначає перший частковий критерій, але при його розрахунку слід враховувати існуючі обмеження, які ґрунтуються на явищі насичення магнітопроводу. Максимальна індукція B_0 має місце в основанні магнітопроводу.

Співвідношення магнітних потоків [5]

$$\frac{\Phi_0}{\Phi_\delta} = 1 + \frac{h_0(\Delta_o)\delta}{2d\Delta_o}.$$

Максимальна індукція в магнітопроводі електромагніту, Тл

$$B_o(\Delta_o) = B_\delta \left(1 + \frac{h_0(\Delta_o)\delta}{2d\Delta_o} \right).$$

Слід враховувати, що індукція $B_c(\Delta_o)$ має обмеження за максимальним значенням, котре для більшості магнітних матеріалів становить 1,7...2 Тл.

Індукція, Тл

$$B_c(\Delta_o) = B_\delta \left(1 + \frac{h_0(\Delta_o) \cdot \delta}{3d\Delta_o} \right) \leq B_{\max}.$$

Якщо перетворити це рівняння відносно Δ_o , можна отримати нерівність обмеження Δ_o

$$\frac{B_\delta \delta}{\sqrt{(B_{\max} - B_\delta) 2\mu_0 k_z d \Delta_o}} \leq \Delta_o.$$

Відповідно мінімальне значення за умовами насичення магнітного кола електромагніту м

$$\Delta_{o\min} = \frac{B_\delta \delta}{\sqrt{(B_{\max} - B_\delta) 2\mu_0 k_z d \Delta_o}}.$$

Максимальне значення Δ_o можна прийняти у десять разів більше. Теорети-

чне максимальна величина Δ_o обмежується лише мінімально можливою висотою вікна, котра відповідає діаметру дроту, але при цьому ширина вікна може складати десятки метрів, що забагато та не відповідає ніяким технологічним умовам.

Наближено МРС із урахуванням розсіювання, А

$$F'(\Delta_o) = \frac{\delta B_\delta}{\mu_0} + H(B_\delta) \cdot (2d + \Delta_o) + 2h_0 H[B_c(\Delta_o)] + H[B_o(\Delta_o)](2d + \Delta_o).$$

При розрахунках МРС $F'(\Delta_o)$ не повинна відрізнятися від МРС F більш ніж на 5 %, інакше слід враховувати втрати МРС на намагнічування магнітопроводу і враховувати поля розсіювання у повному обсязі, вирішуючи складну польову задачу.

3.3. Оптимізація за втратами потужності

Опір обмотки, Ом

$$R = \frac{U}{I(\Delta_o)} \text{ або } R = \rho \frac{l(\Delta_o)}{q(\Delta_o)},$$

де ρ – питомий електричний опір провідника, Ом·м.

Вирішуючи ці два рівняння сумісно, можна отримати перетин провідника, мм²

$$q(\Delta_o) = \frac{\pi F \rho}{U} (d + \Delta_o).$$

Кількість витків обмотки електромагніту

$$w(\Delta_o) = \frac{h_0(\Delta_o) \Delta_o k_z}{q(\Delta_o)}.$$

Опір обмотки, Ом

$$R(\Delta_o) = \frac{4(d + \Delta_o) \rho}{q(\Delta_o)} w(\Delta_o).$$

Струм в обмотці електромагніту, А

$$i(\Delta_o) = \frac{F}{w(\Delta_o)}.$$

Втрати потужності в обмотці електромагніту, Вт

$$\Delta P(\Delta_o) = i^2(\Delta_o)R(\Delta_o). \quad (3.2)$$

3.4. Оптимізація за сталою часу

Індуктивність розсіювання обмотки електромагніту, Гн

$$L_{\sigma}(\Delta_o) = w^2(\Delta_o)\mu_0 \frac{\pi d h_0(\Delta_o)}{24\Delta_o}.$$

Постійна часу обмотки електромагніту, с

$$T(\Delta_o) = \frac{L(\Delta_o)}{R(\Delta_o)}. \quad (3.3)$$

Критерії втрат потужності та сталої часу відповідають завданням підвищення експлуатаційних вимог до ЕА, тому що вони спрямовані на зменшення втрат ЕЕ та підвищенні їх швидкодії, що особливо важливо для апаратів захисту.

3.5. Комплексна оптимізація

Відповідно до формул, які наведені у [6], розраховуються масштабовані часткові критерії та комплексний питома-варіаційний критерій (КПВК).

Часткові критерії розраховуються за формулами (3.1)...(3.3).

Комплексний питома-варіаційний критерій

$$k(\Delta_o) = \frac{m(\Delta_o)}{m_{\text{ср}}} \cdot a_m + \frac{\Delta P(\Delta_o)}{\Delta P_{\text{ср}}} \cdot a_{\Delta P} + \frac{T(\Delta_o)}{T_{\text{ср}}} \cdot a_T.$$

Враховуючи великий вплив обмежень незалежної змінної на КПВК, дуже важливо правильно визначити мінімальне та максимальне значення Δ_o .

Якщо насичення магнітопроводу чітко визначає мінімальне припустиме значення Δ_o , тоді максимальна межа залишається невизначеною або має обмеження, що на декілька порядків перевищує розумні технологічні значення.

Тому було прийняте рішення, що максимальне Δ_o дорівнює $10\Delta_{o\text{min}}$, але слід чітко розуміти, що це не жорстка межа і, якщо зовнішній вигляд кінцевої залежності передбачає розширення або звуження діапазону пошуку оптимального рішення, тоді можна її змінювати.

Пошук оптимального рішення виконується графічно після побудови КПК.

Висновки до розділу 3.

Виконано побудову алгоритму реалізації параметричної оптимізації електромагнітного ЕА на основі класичного підходу. Алгоритм відрізняється простою реалізацією, тому що носить лінійний характер, і може бути легко переформатований шляхом додавання додаткових часткових критеріїв.

РОЗДІЛ 4. ПРАКТИЧНЕ ЗАСТОСУВАННЯ АЛГОРИТМУ ОПТИМІЗАЦІЇ УЗАГАЛЬНЕНОГО ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО АПАРАТА

4.1. Вихідні дані для розрахунку

Вихідними даними для виконання оптимізації є:

коефіцієнт заповнення вікна електромагніту $k_z = 0,7$;

максимальний повітряний зазор якоря $\delta = 0,005$ м;

максимальна щільність струму $\Delta = 4 \cdot 10^6$ А/м²;

індукція у повітряному зазорі $B_\delta = 0,4$ Тл;

напруга живлення обмотки $U = 220$ В;

необхідна мінімальна сила тяги електромагніту $F_T = 5$ Н.

4.2. Результати розрахунку

Розрахунки виконувалися у відповідності з алгоритмом викладеним у третьому розділі. Всі розрахунки, виконані за допомогою програми MathCad, наведені у дод. А.

На рис. 4.1 наведені результати оптимізації за масою активної частини.

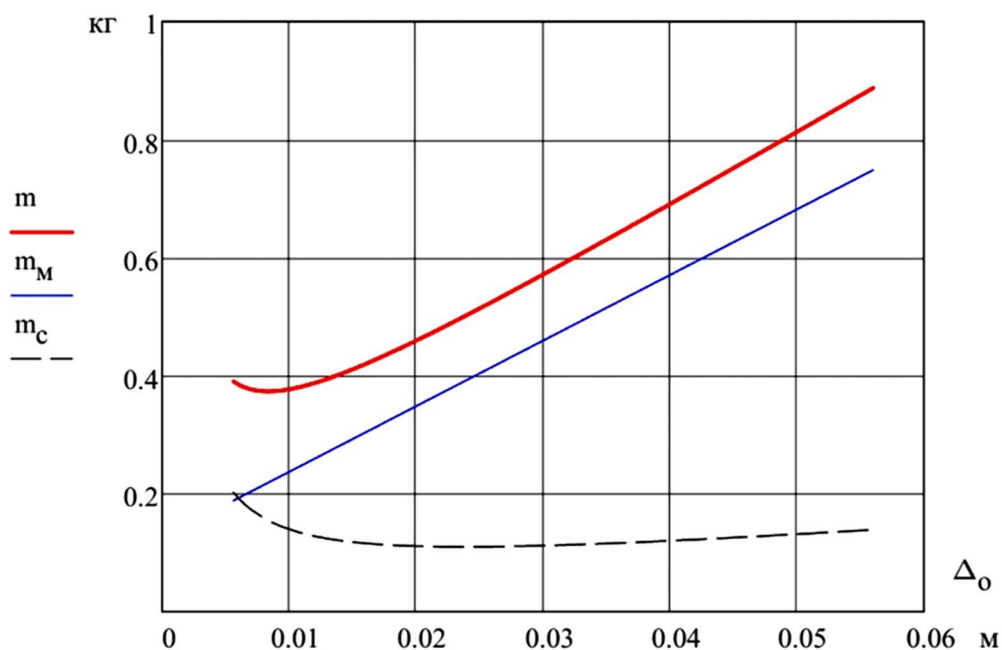


Рис. 4.1. Оптимізація за масою

За рис. 4.1 маса сталі має визначений мінімум, але змінюється несуттєво по всьому діапазоні незалежної змінної, маса міді значно зростає при збільшенні ши-

рини вікна. На загальну масу має більший вплив маса міді, тому вона також зростає при рості ширини вікна. За критерієм маси бажано щоб Δ_o було б як можна менше.

На рис. 4.2. наведено результати оптимізаційних розрахунків за критерієм втрат потужності.

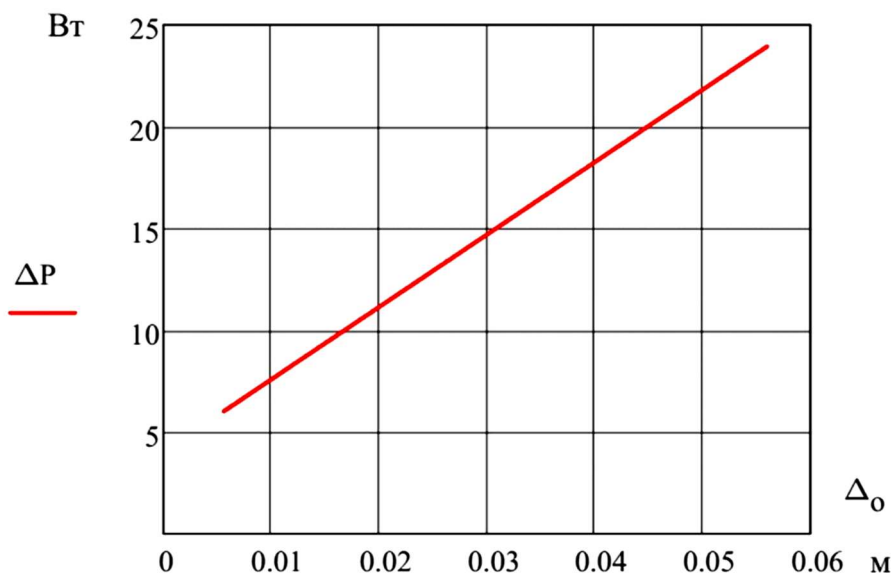


Рис. 4.2. Оптимізація за втратами потужності

Відповідно рис. 4.2 та наведеним у розділі 3 розрахунковим формулам втрати потужності лінійно залежать від ширини вікна, тому бажано щоб Δ_o було б як можна менше, що повторює попередній висновок. Це говорить про те, що критерії маси та втрат потужності являються спорідненими.

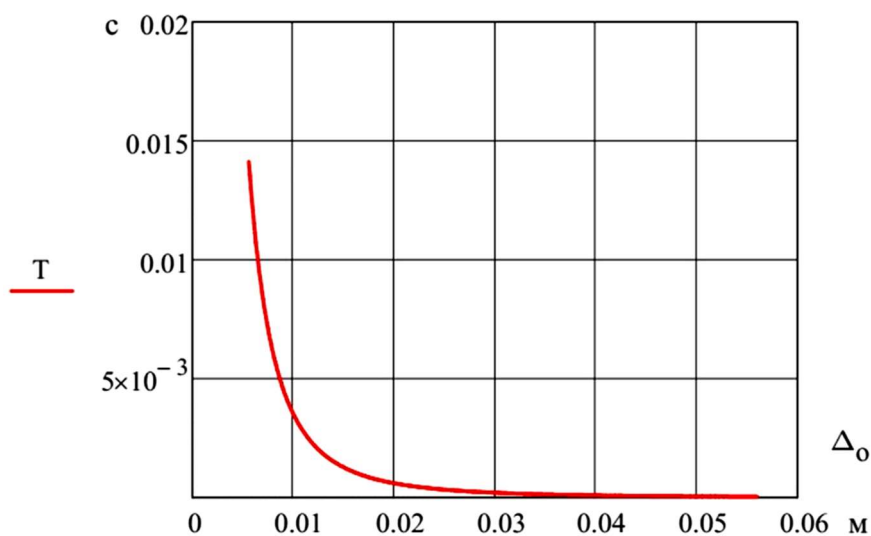


Рис. 4.3. Оптимізація за сталою часу

На рис. 4.3 зображено результати оптимізації за сталою часу обмотки електромагніту.

Критерій (рис. 4.3) демонструє зворотну залежність від Δ_o . Тому зменшення Δ_o призводить до росту сталої часу, а відповідно до зменшення швидкодії ЕА. Цей критерій входить у конфлікт з двома попередніми, а відповідно породжує можливість отримати чітко визначений оптимум.

За трьома частковими критеріями розраховано коефіцієнти масштабування згідно методики наведених у розділі 2 та отримано залежність КПВК (рис. 4.4).

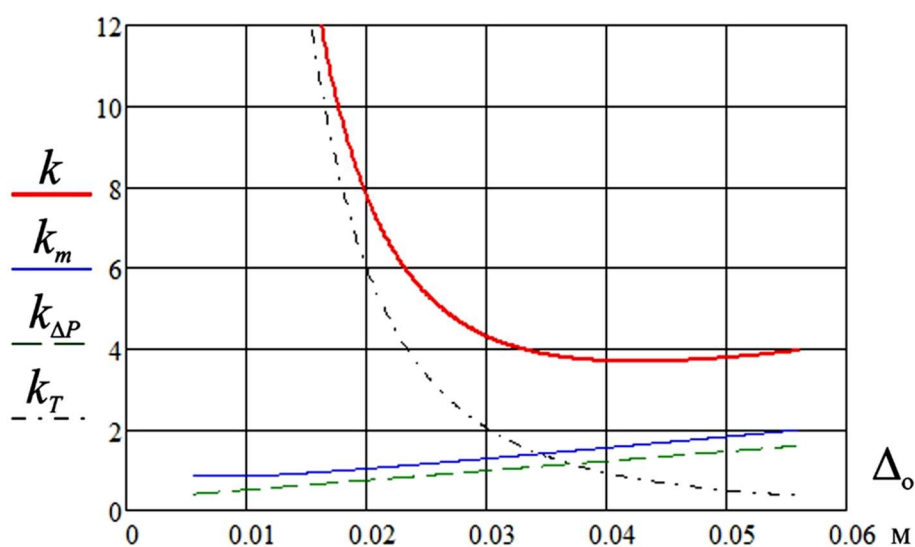


Рис. 4.4. Комплексний питомо-варіаційний критерій і його часткові складові

Як видно із графіків (рис. 4.4), найбільш градієнтним і впливовим є частковий критерій, котрий відображає залежність постійної часу від ширини обмотки. Даний критерій входить у конфлікт із двома іншими і являється визначальним, тому що має максимальну функціональну активність у діапазоні пошуку оптимального рішення. Оптимальне значення $\Delta_{\text{опт}} = 0,043$ м.

Для перевірки правильності побудови алгоритму розрахунку оптимального рішення виконано побудову графіка тягового зусилля електромагніту у залежності від повітряного зазору (рис. 4.5).

Тягове зусилля повинно бути не менше вказаного у початкових даних, що спостерігається на графіку (рис. 4.5). Відповідно алгоритм розрахунку побудовано

вірно. При зменшенні повітряного зазору до малих значень F_T різко зростає, що пояснюється зменшенням магнітного опору за шляхом основного магнітного потоку та відповідно зменшення полів розсіювання.

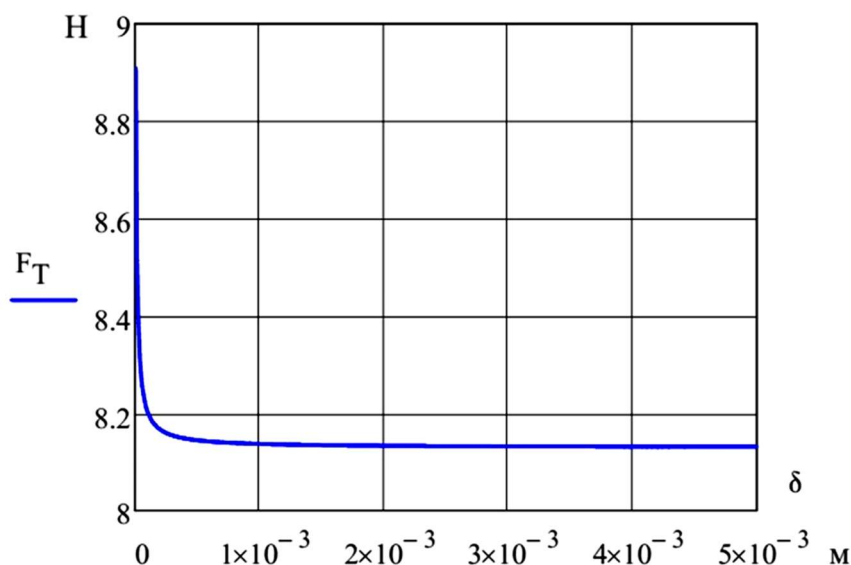


Рис. 4.5. Тягова характеристика електромагніту

Тягова характеристика розраховується за формулою, Н

$$F_T(\delta) = \frac{F'(\delta)^2 d^2 \mu_0}{2\delta^2},$$

де $F'(\delta)$ – МРС з урахуванням полів розсіювання.

МРС з урахуванням полів розсіювання, А

$$F'(\delta) = \frac{B_\delta \delta}{\mu_0} + H(B_\delta) \cdot (2d + \Delta_{\text{оопт}}) + 2H(B_c(\delta))h_o + H(B_o(\delta)) \cdot (2d + \Delta_{\text{оопт}}),$$

де $B_o(\delta) = B_\delta \left(1 + \frac{h_o \delta}{2d\Delta_{\text{оопт}}}\right)$ – максимальна індукція у основані магнітопроводу, Тл;

$B_c(\delta) = B_\delta \left(1 + \frac{h_o \delta}{3d\Delta_{\text{оопт}}}\right)$ – середня індукція у стрижнях, Тл.

На рис. 4.6 наведено перехідний процес у обмотці електромагніту, котрий розраховано за умовами наявності лише стаціонарних полів розсіювання та незмінності основного поля, що вносить похибку у форму кривої струму, але не впливає значно на час перехідного процесу.

Можна помітити (рис. 4.6), що власний перехідний електромагнітний про-

цес у обмотці закінчується менш ніж за 0,5 мс, це достатньо висока швидкість, котра спроможна забезпечити необхідну швидкодію ЕА на рівні найшвидших.

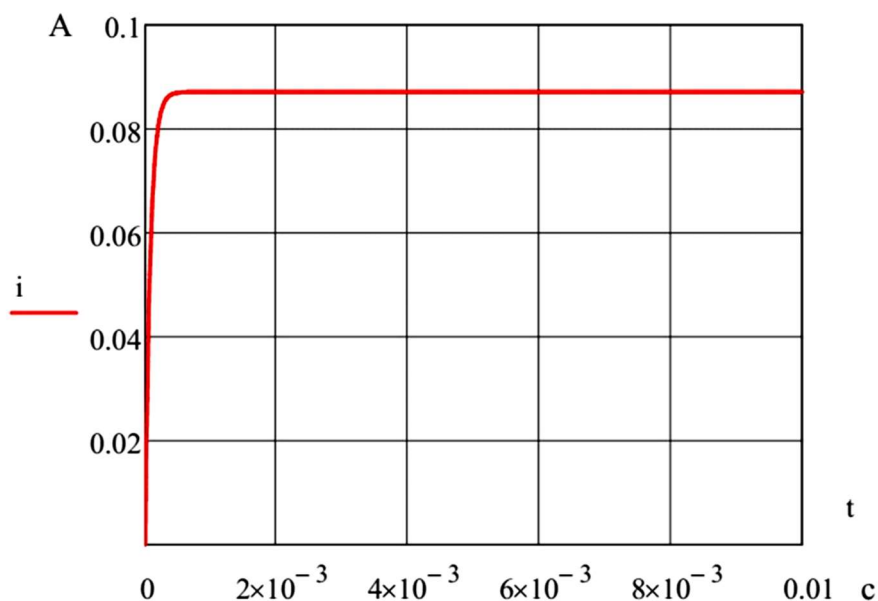


Рис. 4.6. Струм електромагніту при вмиканні

Перехідний процес (рис. 4.6) описується рівнянням

$$i(t) = \frac{U}{R(\Delta_{\text{оопт}})} \left(1 - e^{\frac{-t}{T(\Delta_{\text{оопт}})}} \right).$$

Останнє рівняння являється рішенням класичного випадку: підключення активно-індуктивного опору на джерело живлення.

Висновки до розділу 4.

Виконано застосування алгоритму параметричної оптимізації ЕА на основі класичного методу, який показав, що існує однозначне рішення, котре рівноважне задовольняє вимогам капітальних та експлуатаційних витрат при забезпеченні високого технічного рівня ЕА електромагнітного типу.

ВИСНОВКИ

У магістерській роботі виконано дослідження питання оптимального проектування електричних апаратів, що надало можливість отримати наступні висновки:

1. Виконано розгляд та аналіз методів параметричної оптимізації й їх критеріїв, які показали, що в якості математичних інструментів визначення найкращого співвідношення параметрів електромагнітних електричних апаратів за техніко-економічними показниками слід застосовувати класичні методи, як більш об'єктивні, а в якості комплексного критерію – комплексний питомо-варіаційний критерій.

2. На підставі аналізу особливостей задачі параметричної оптимізації електромагнітних ЕА визначено, що для забезпечення високого рівня технологічності виробництва, мінімальних капітальних та експлуатаційних витрат, максимальної швидкодії електромагнітного ЕА слід застосувати наступні часткові критерії оптимізації: маса активної частини, втрати потужності та стала часу обмотки. За незалежну змінну прийнято ширину вікна електромагніту.

3. Отримано алгоритм визначення часткових критеріїв та на підставі виконаних розрахунків проаналізовано характер залежності часткових цільових функцій від незалежної змінної. Встановлено, що маса та втрати потужності є спорідненими критеріями, а стала часу являється конфліктною до них.

4. Виконано застосування алгоритму параметричної оптимізації ЕА на основі класичного методу, який показав, що існує однозначне рішення, котре адовольняє вимогам капітальних та експлуатаційних витрат при забезпеченні високого технічного рівня ЕА електромагнітного типу.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Електричні апарати: навч. посіб. / В. О. Лесько, В. О. Комар, С. В. Кравчук, О. В. Сікорська. – Вінниця: ВНТУ, 2018. – 102 с.
2. Електричні апарати: навчальний посібник / М.Т. Лут, А.М. Мрачковський; За ред. А.М. Мрачковського. - К.: КОМПРИНТ, 2017. - 560 с.
3. Жорняк Л.Б. Електричні апарати автоматики та керування / Л. Б. Жорняк, М. В. Антонова, В. В. Василевський. – Запоріжжя: НУ «Запорізька політехніка», 2022. – 414 с.
4. Загирняк М.В., Кузнецов Н.И. Электрические аппараты. – Учебное пособие. – Кременчуг: КДПУ, 2005. – 320 с.
5. Кимстач О.Ю., Бондаренко А.Ю. Оптимизация электромагнитных электрических аппаратов // Сборник публикаций мультидисциплинарного научного журнала «Архивариус» по материалам XXXV международной научно-практической конференции: «Наука в современном мире». – К.: Мультидисциплинарный научный журнал «Архивариус», 2018. – С. 84-88.
6. Кимстач, О.Ю. Комплексный удельно-вариационный критерий оптимизации // Наука и мир. Международный научный журнал. – Волгоград: Издательство «Научное обозрение», № 3 (7), 2014, Том 1. С. 27 – 30.
7. Кімстач О.Ю., Берлінський Д.С., Горобець М.О. Визначення головних розмірів трансформатора з обертовим магнітним полем // Інформаційне суспільство: технологічні, економічні та технічні аспекти становлення: матеріали Міжнародної наукової інтернет-конференції, ГО «Наукова спільнота», WSZIA w Opolu. Тернопіль: ФОП Шпак В.Б. Вип. 93, 2024 – С. 99-102.
8. Кімстач О.Ю., Коваленко О.І. Оптимальне проектування електромагнітних апаратів // Actual scientific research in the modern world. Journal. - Pereiaslav, 2025. - Issue 8(123), pp. 95-101.
9. Клименко Б.В. Електричні та магнітні пристрої, електричні аксесуари, електричні установки. Терміни, тлумачення, коментарі. – Навчальний посібник. – Х.: Вид-во «Точка», 2009. – 272 с.
10. Клименко Б.В. Комутаційна апаратура, апаратура керування, запобіжни-

ки. Терміни, тлумачення, коментарі. – Навчальний посібник. – Х.: Вид-во «Талант», 2008. – 228 с.

11. Клименко Б.В. Електричні апарати. Електромеханічна апаратура комутації, керування та захисту. Загальний курс: навчальний посібник. – Харків: Вид-во «Точка», 2012. – 340 с.

12. Козлов В.Д. Електричні апарати. Модуль 1. Загальні питання електричних апаратів: Посібник – К.: НАУ, 2005. – 92 с.

13. Козлов В.Д., Єнчев С.В. Електричні апарати. Модуль 3. Вимірювальні, контролювальні та захисні апарати: Посібник. – К.: НАУ, 2007. – 72 с.

14. Козлов В.Д., Соломаха М.І. Електричні апарати. Модуль 2. Комутаційні апарати низької та середньої напруги: Посібник – К.: НАУ, 2006. – 84 с.

15. Марилов Н.Г., Ребедак О.А. Оптимизация конструкции магнитопровода электромагнита постоянного тока клапанного типа // Научный вестник ДГМА. – Краматорск, № 1 (7Е), 2011. С. 166-171.

16. Пелевин Д.Е. Оптимизация параметров электромагнитов управления магнитным полем // Електротехніка і Електромеханіка. 2006. №3. С.31-34.

17. Шестеренко В.Є. Системи електроспоживання та електропостачання промислових підприємств. Підручник / В.Є. Шестеренко. – Вінниця: Нова Книга, 2004. – 656 с.

Додаток А. Розрахунок оптимізації електромагніта

Вихідні параметри:

$$k_z := 0.7$$

$$U := 220 \text{ В}$$

$$\delta := 0.005 \text{ м}$$

$$F_T := 5 \text{ Н}$$

$$\Delta := 4 \cdot 10^6 \frac{\text{А}}{\text{м}}$$

$$\rho := 1.78 \cdot 10^{-8}$$

$$\mu_0 := 4\pi \cdot 10^{-7}$$

$$B_\delta := 0.4 \text{ Тл}$$

$$\rho_M := 8900 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$$

$$\rho_C := 7800 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$$

Оптимізація за масою

Діаметр стрижня

$$d := \frac{4 \cdot \sqrt{2 \cdot \mu_0 \cdot F_T}}{\pi \cdot B_\delta} = \frac{4 \cdot \sqrt{2 \cdot 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 5}}{\pi \cdot 0.4} = 0.0113 \text{ м},$$

Мінімальне значення ширини вікна

$$\Delta_{\text{omin}} := \frac{B_\delta \cdot \delta \cdot \mu_0^{-0.5}}{\sqrt{2 \cdot k_z \cdot \Delta \cdot d \cdot (2 - B_\delta)}} = \frac{0.4 \cdot 0.005 \cdot (4 \cdot \pi \cdot 10^{-7})^{-0.5}}{\sqrt{2 \cdot 0.7 \cdot 4 \cdot 10^6 \cdot 0.0113 \cdot (2 - 0.4)}} = 0.00561 \text{ м}$$

Максимальне значення ширини вікна

$$\Delta_{\text{omax}} := \Delta_{\text{omin}} \cdot 10 = 0.0561 \text{ м}$$

МРС

$$F := \frac{B_\delta \cdot \delta}{\mu_0} = \frac{0.4 \cdot 5 \times 10^{-3}}{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}} = 1.591 \times 10^3 \text{ А}$$

Висота обмотки

$$h_0(\Delta_o) := \frac{F}{\Delta \cdot \Delta_o \cdot k_z}$$

Маса мідді

$$m_M(\Delta_o) := \frac{\pi \cdot F \cdot \rho_M}{\Delta} \cdot (d + \Delta_o)$$

Маса магнітопроводу

$$m_c(\Delta_o) := \frac{\pi}{2} d^2 \cdot \rho_c \cdot (2d + \Delta_o + h_0(\Delta_o))$$

Маса електромагніту

$$m(\Delta_o) := m_M(\Delta_o) + m_c(\Delta_o)$$

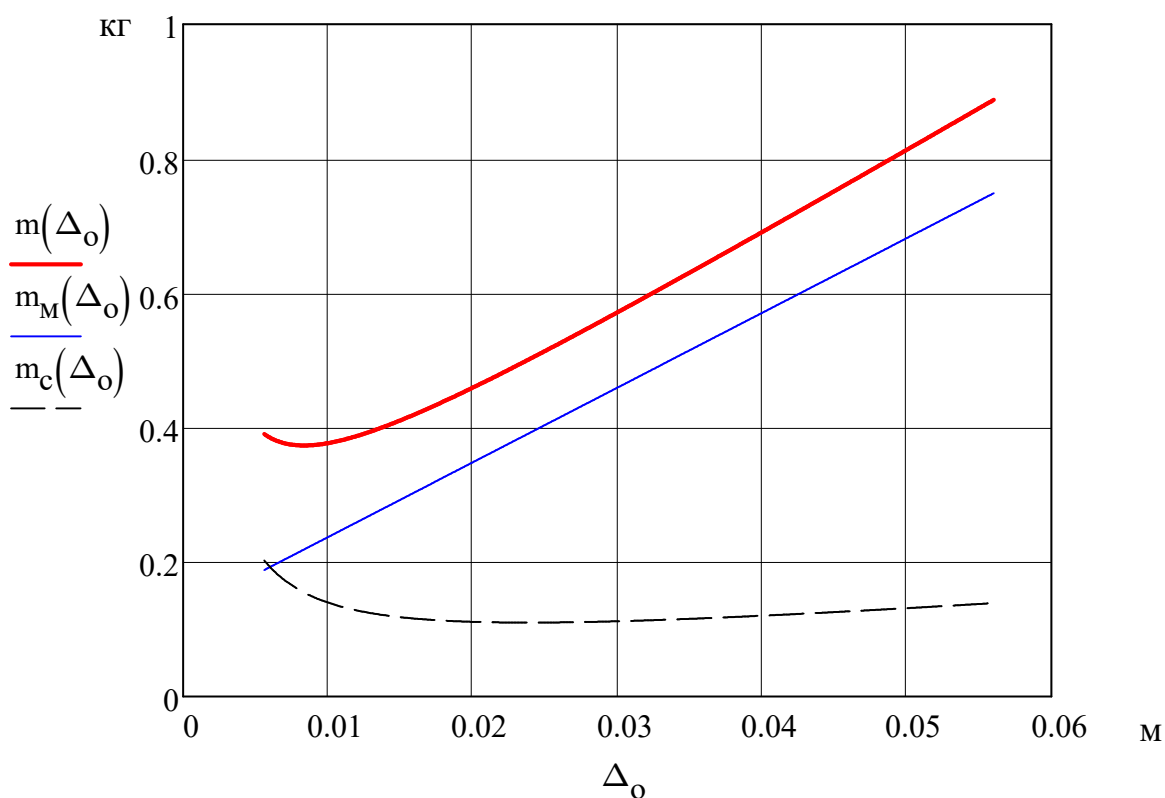


Рис. А.1. Залежності маси

Оптимальне значення ширини вікна $\Delta_{\text{ООПТ}} = 8.37 \times 10^{-3} \text{ м}$,

що забезпечує мінімум маси електромагніту

$$m(\Delta_{\text{ООПТ}}) = 0.373 \text{ кг}$$

Висота обмотки

$$h_o := h_0(\Delta_{\text{ООПТ}}) = 0.0679 \text{ м}$$

Перевірка максимальної індукції

$$B_o := B_\delta \cdot \left(1 + \frac{h_o \cdot \delta}{2d \cdot \Delta_{\text{ООПТ}}} \right) = 0.4 \cdot \left(1 + \frac{0.0679 \cdot 0.005}{2 \cdot 0.0113 \cdot 0.00837} \right) = 1.12 \text{ Тл} < 2 \text{ Тл}$$

Середня індукція у стріжнях

$$B_c := B_\delta \cdot \left(1 + \frac{h_o \cdot \delta}{3d \cdot \Delta_{\text{оопт}}} \right) = 0.4 \cdot \left(1 + \frac{0.0679 \cdot 0.005}{3 \cdot 0.0113 \cdot 0.00837} \right) = 0.879 \quad \text{Тл}$$

Матриці кривої намагнічування

$$H_Z := \begin{pmatrix} 0 \\ 0.56 \\ 0.63 \\ 0.7 \\ 0.78 \\ 0.89 \\ 0.99 \\ 1.11 \\ 1.25 \\ 1.32 \\ 1.41 \\ 1.7 \\ 2.1 \\ 2.5 \\ 3 \\ 4.3 \\ 6.2 \\ 11.3 \\ 18.6 \\ 25 \\ 34 \\ 50 \\ 70 \\ 130 \\ 207 \end{pmatrix} \quad B_Z := \begin{pmatrix} 0 \\ 0.4 \\ 0.5 \\ 0.6 \\ 0.7 \\ 0.81 \\ 0.9 \\ 1.01 \\ 1.1 \\ 1.15 \\ 1.2 \\ 1.25 \\ 1.31 \\ 1.35 \\ 1.4 \\ 1.45 \\ 1.5 \\ 1.55 \\ 1.61 \\ 1.65 \\ 1.7 \\ 1.75 \\ 1.8 \\ 1.9 \\ 2 \end{pmatrix}$$

Функція апроксимації кривої намагнічування

$$gr := \text{pspline}(B_Z, H_Z) \quad H(B_{ZZ}) := \text{interp}(gr, B_Z, H_Z, B_{ZZ})$$

$$B_{zz} := 0,001 \dots 2$$

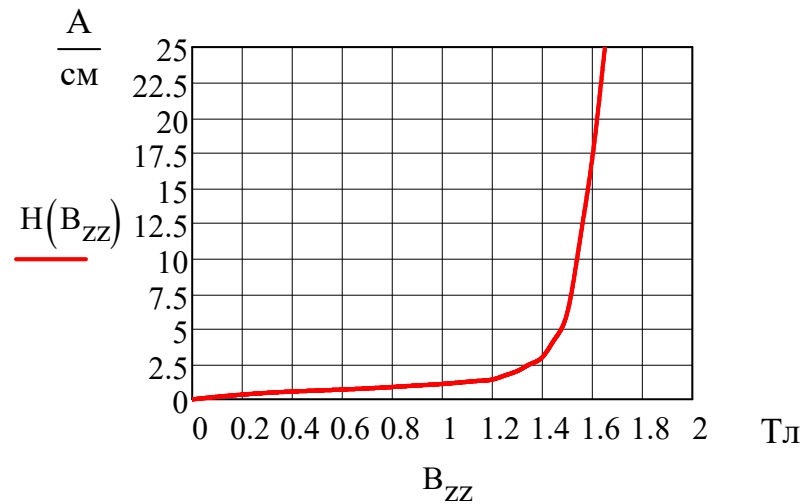


Рис. А.2. Крива намагнічування

Ширина магнітопровода

$$\Delta_c := 2d + \Delta_{\text{опт}} = 2 \cdot 0.0113 + 0.00837 = 0.031 \text{ м}$$

МРС з урахуванням розсіювання

$$F' := \frac{B_\delta \cdot \delta}{\mu_0} + H(B_\delta) \cdot (\Delta_c) + 2 \cdot H(B_c) \cdot h_o + H(B_o) \cdot (\Delta_c) = 1.592 \times 10^3 \text{ А}$$

$$F' = 1.592 \times 10^3 \text{ А}$$

$$F = 1.591 \times 10^3 \text{ А}$$

Перевірка

$$\frac{F'}{F} = 1 < 1,05$$

Оптимізація за втратами потужності

Перетин дроту

$$q(\Delta_o) := \frac{\pi F \cdot \rho}{U} \cdot (d + \Delta_o)$$

Кількість витків обмотки

$$w(\Delta_o) := \frac{h_0(\Delta_o) \cdot \Delta_o \cdot k_z}{q(\Delta_o)}$$

Опір обмотки

$$R(\Delta_o) := \frac{\pi(d + \Delta_o) \cdot \rho}{q(\Delta_o)} \cdot w(\Delta_o)$$

Струм

$$i(\Delta_o) := \frac{F}{w(\Delta_o)}$$

Втрати потужності

$$\Delta P(\Delta_o) := (i(\Delta_o))^2 \cdot R(\Delta_o)$$

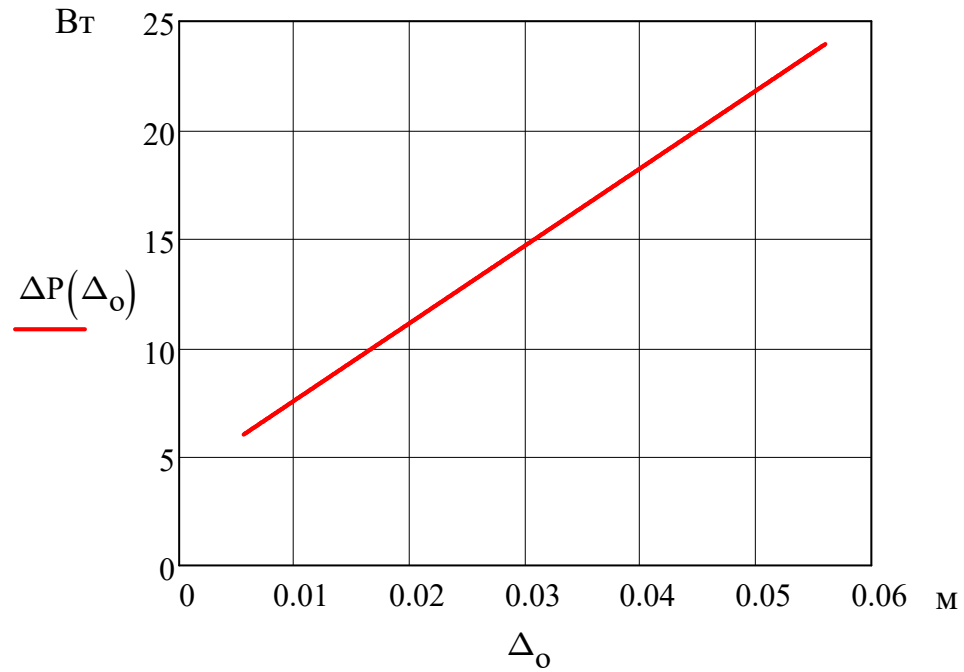


Рис. А.3. Втрати потужності

Оптимальне значення ширини вікна $\Delta_{\text{ООПТ}} = 5.61 \times 10^{-3}$ м,

що забезпечує мінімум втрат потужності $\Delta P(\Delta_{\text{ООПТ}}) = 6.018$ Вт

Оптимізація за сталою часу

Індуктивність розсіювання

$$L_{\sigma}(\Delta_o) := w(\Delta_o)^2 \cdot \mu_0 \cdot \frac{d \cdot \pi}{8} \cdot \frac{h_0(\Delta_o)}{3 \cdot \Delta_o}$$

Стала часу $T(\Delta_o) := \frac{L_{\sigma}(\Delta_o)}{R(\Delta_o)}$

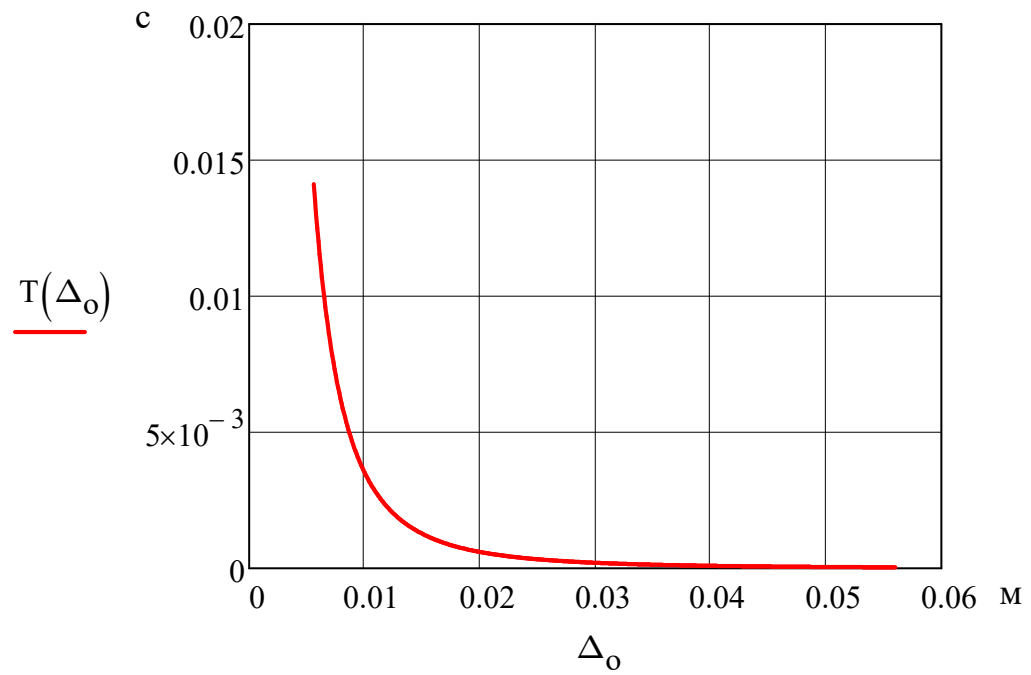


Рис. А.4. Стала часу

Оптимізація за комплексним питомо-варіативним критерієм

Похідна першого часткового критерію

$$m'(\Delta_o) := \frac{d}{d\Delta_o} m(\Delta_o)$$

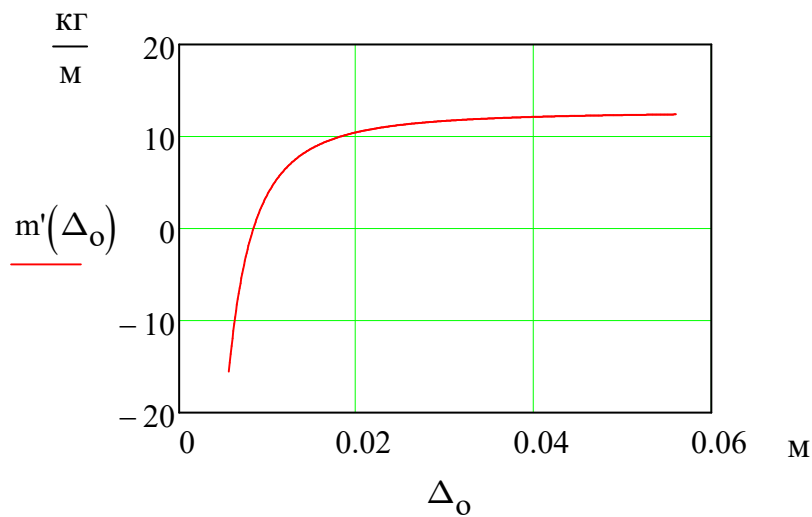


Рис. А.5. Похідна маси

Середнє модульне інтегральне значення для першого часткового критерію

$$m_{cp} := \frac{\int_{\Delta_{omin}}^{\Delta_{omax}} |m(\Delta_o)| d\Delta_o}{|\Delta_{omax} - \Delta_{omin}|} = 0.593 \quad \text{кг}$$

Складові коефіцієнта активності для першого часткового критерію

$$a_{mc} := \frac{|\Delta_{\text{omax}} - \Delta_{\text{omin}}|}{2} = \frac{|0.0561 - 0.00561|}{2} = 0.025 \quad \text{м}$$

$$a_{mcc} := (|m'(\Delta_{\text{omin}})| + |m'(\Delta_{\text{omax}})|) = 28 \quad \frac{\text{кг}}{\text{м}}$$

Коефіцієнт активності для першого часткового критерію

$$a_m := \frac{a_{mcc} \cdot a_{mc}}{\int_{\Delta_{\text{omin}}}^{\Delta_{\text{omax}}} |m'(\Delta_o) + \epsilon| d\Delta_o} = 1.328$$

Перший частковий критерій

$$k1(\Delta_o) := \frac{m(\Delta_o)}{m_{cp}} \cdot a_m$$

Похідна другого часткового критерію

$$\Delta P'(\Delta_o) := \frac{d}{d\Delta_o} \Delta P(\Delta_o)$$

Середнє модульне інтегральне значення для другого часткового критерію

$$\Delta P_{cp} := \frac{\int_{\Delta_{\text{omin}}}^{\Delta_{\text{omax}}} |\Delta P(\Delta_o)| d\Delta_o}{|\Delta_{\text{omax}} - \Delta_{\text{omin}}|} = 15.002 \quad \text{Вт}$$

Складові коефіцієнта активності для другого часткового критерію

$$a_{\Delta Pc1} := |\Delta P'(\Delta_{\text{omin}})| = 355.877 \quad \frac{\text{Вт}}{\text{м}}$$

$$a_{\Delta Pc2} := |\Delta P'(\Delta_{\text{omax}})| = 355.877 \quad \frac{\text{Вт}}{\text{м}}$$

$$a_{\Delta Pc} := a_{\Delta Pc1} + a_{\Delta Pc2} = 711.754 \quad \frac{\text{Вт}}{\text{м}}$$

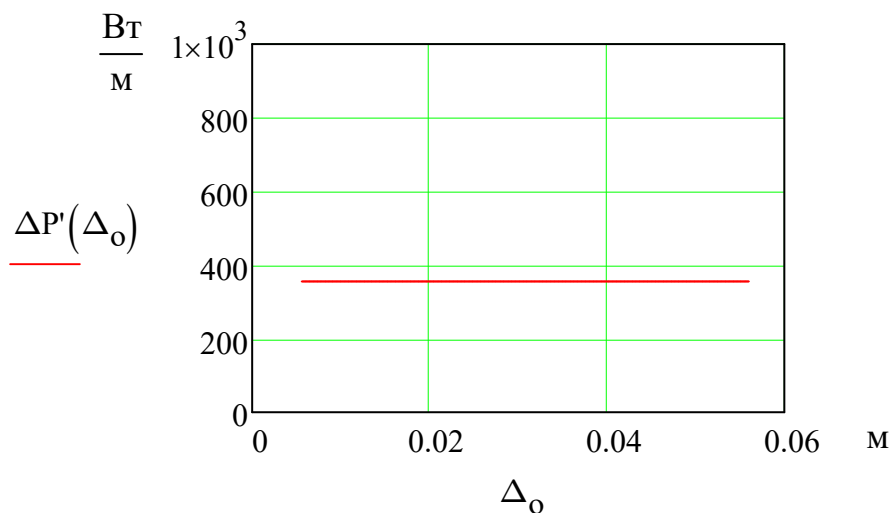


Рис. А.6. Похідна втрат потужності

Коефіцієнт активності для другого часткового критерію

$$a_{\Delta P} := \frac{a_{mc} \cdot a_{\Delta P c}}{\int_{\Delta_{omin}}^{\Delta_{omax}} |\Delta P'(\Delta_o) + \varepsilon| d\Delta_o} = 1$$

Другий частковий критерій

$$k2(\Delta_o) := \frac{\Delta P(\Delta_o)}{\Delta P_{cp}} \cdot a_{\Delta P}$$

Похідна 3 часткового критерію

$$T'(\Delta_o) := \frac{d}{d\Delta_o} T(\Delta_o)$$

Середнє модульне інтегральне значення для 3 часткового критерію

$$T_{cp} := \frac{\int_{\Delta_{omin}}^{\Delta_{omax}} |T(\Delta_o)| d\Delta_o}{|\Delta_{omax} - \Delta_{omin}|} = 1.041 \times 10^{-3} \text{ с}$$

Складові коефіцієнта активності для 3 часткового критерію

$$a_{Tc1} := |T'(\Delta_{omin})| = 5.867 \quad \frac{с}{м}$$

$$a_{Tc2} := |T'(\Delta_{\text{omax}})| = 1.788 \times 10^{-3} \quad \frac{c}{m}$$

$$a_{Tc} := a_{Tc1} + a_{Tc2} = 5.87 \quad \frac{c}{m}$$

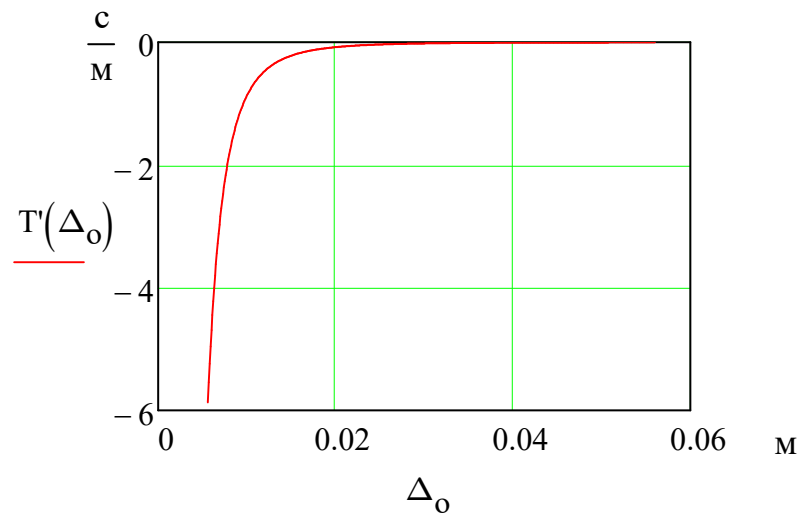


Рис. А.7. Похідна сталої часу

Коефіцієнт активності для 3 часткового критерію

$$a_T := \frac{a_{mc} \cdot a_{Tc}}{\int_{\Delta_{\text{omin}}}^{\Delta_{\text{omax}}} |T'(\Delta_o) + \epsilon| d\Delta_o} = 10.524$$

3 частковий критерій

$$k3(\Delta_o) := \frac{T(\Delta_o)}{T_{cp}} \cdot a_T$$

Питомо-варіаційний критерій оптимізації

$$k(\Delta_o) := k1(\Delta_o) + k2(\Delta_o) + k3(\Delta_o)$$

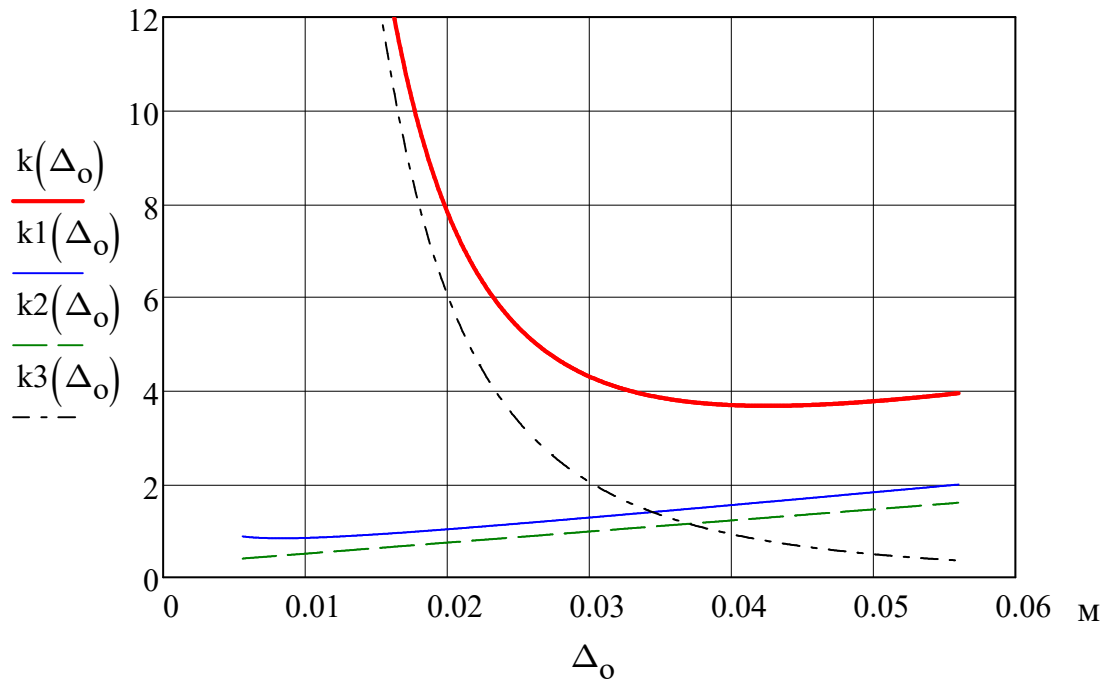


Рис. А.8. Комплексний критерій та його складові

Оптимальне значення ширини вікна $\Delta_{\text{ООПТ}} = 0.043 \text{ м,}$

що забезпечує мінімум питомо-варіаційного критерію

Розрахунок тягової характеристики

Максимальна індукція

$$B_o(\delta) := B_\delta \cdot \left(1 + \frac{h_o \cdot \delta}{2d \cdot \Delta_{\text{ООПТ}}} \right)$$

Середня індукція у стріжнях

$$B_c(\delta) := B_\delta \cdot \left(1 + \frac{h_o \cdot \delta}{3d \cdot \Delta_{\text{ООПТ}}} \right)$$

МРС з урахуванням розсіювання

$$F'(\delta) := \frac{B_\delta \cdot \delta}{\mu_0} + H(B_\delta) \cdot (2d + \Delta_{\text{ООПТ}}) + 2 \cdot H(B_c(\delta)) \cdot h_o + H(B_o(\delta)) \cdot (2d + \Delta_{\text{ООПТ}})$$

Тягове зусілля

$$F_T(\delta) := \frac{F'(\delta)^2 \cdot d^2 \cdot \mu_0}{2 \cdot \delta^2}$$

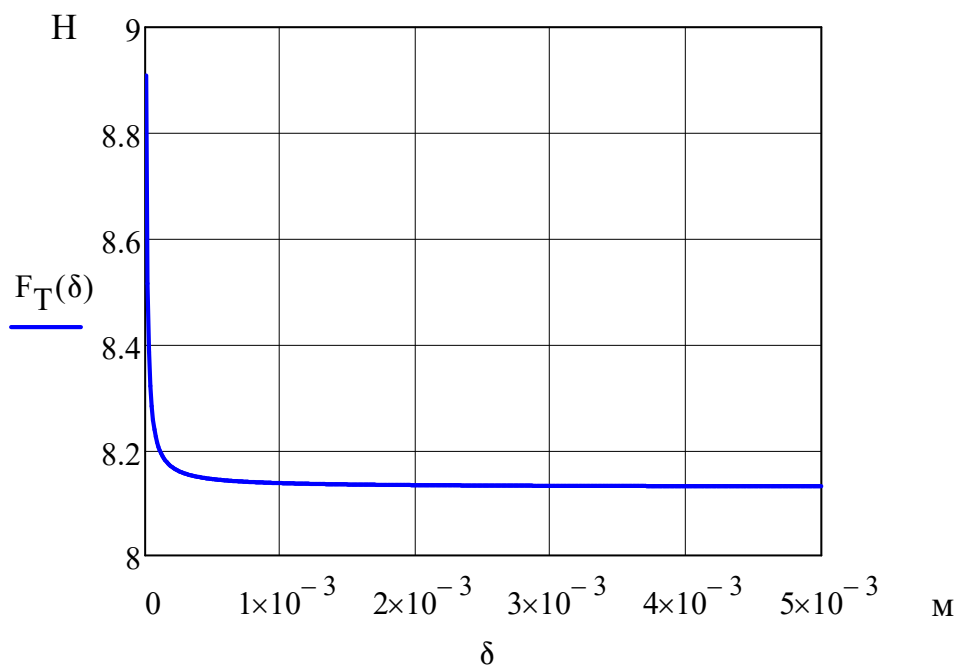


Рис. А.9. Тягова характеристика

Розрахунок перехідної характеристики

Струм

$$i(t) := \frac{U}{R(\Delta_{\text{оопт}})} \cdot \left(1 - e^{\frac{-t}{T(\Delta_{\text{оопт}})}} \right)$$

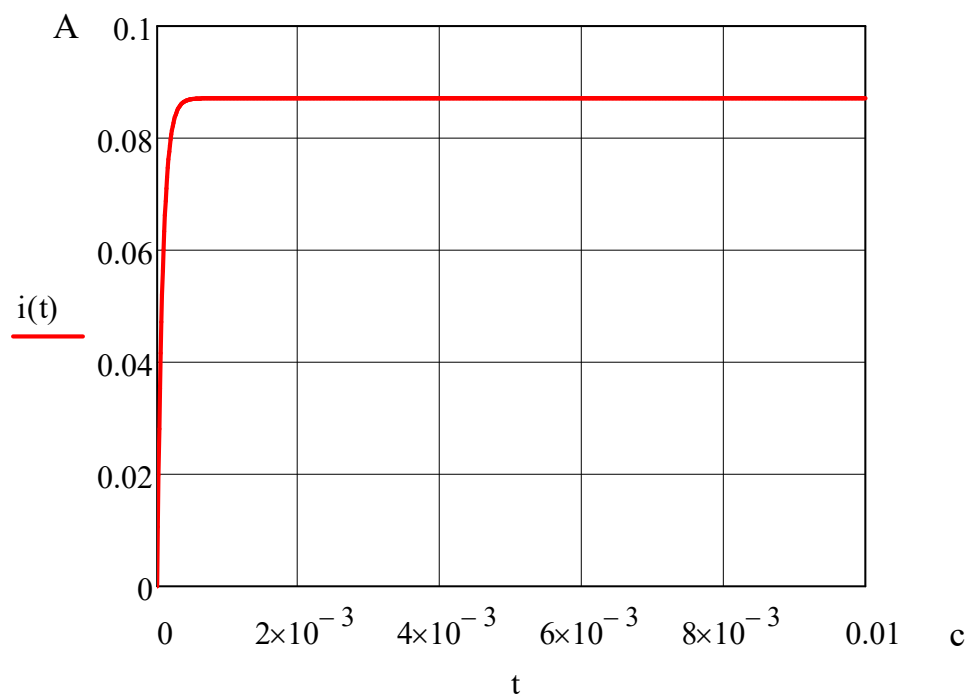


Рис. А.10. Перехідна характеристика

ДОДАТОК Б. Копія сертифікату учасника конференції



iScience®

Міжнародна наукова конференція
«АКТУАЛЬНІ НАУКОВІ ДОСЛІДЖЕННЯ У СУЧАСНОМУ СВІТІ»

СЕРТИФІКАТ

підтверджує, що

Коваленко Олександр Ігорович

автор статті:

«ОПТИМАЛЬНЕ ПРОЕКТУВАННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ АПАРАТІВ»

взяв участь в СХХІІІ Міжнародній науковій конференції
«АКТУАЛЬНІ НАУКОВІ ДОСЛІДЖЕННЯ В СУЧАСНОМУ СВІТІ» (26-27 жовтня 2025 р.)

Кількість годин: 15 (0,5 кредитів ЄКТС)



голова оргкомітету, канд. іст. наук,
Олег Водяний

м. Переяслав • Україна

27.10.2025 р.

KA2510020