

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

ПОГОДЖЕНО
Директор ННІ енергетики,
автоматики і енергозбереження

_____ Каплун В.В.
(підпис)

« ____ » _____ 2025 р.

ДОПУСКАЄТЬСЯ ДО ЗАХИСТУ
Завідувач кафедри
електротехніки, електромеханіки та
електротехнологій

_____ Окушко О.В.
(підпис)

« ____ » _____ 2025 р.

МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

**на тему: «Дослідження режимів роботи автоматичного вимикача живлення
низької напруги»**

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

Освітня програма Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
(назва)

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

Гарант освітньої програми

К.Т.Н., доцент
(науковий ступінь та вчене звання)

_____ (підпис)

Усенко С.М.
(ПІБ)

Керівник магістерської кваліфікаційної роботи

К.Т.Н., доцент
(науковий ступінь та вчене звання)

_____ (підпис)

Сорокін Д.С.
(ПІБ)

Виконав

_____ (підпис)

Опанасенко О.А.
(ПІБ)

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ
ІНСТИТУТ ЕНЕРГЕТИКИ, АВТОМАТИКИ І ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ**

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри
електротехніки, електромеханіки та
електротехнологій

к.т.н., доцент _____ Окушко О.В.
(ступінь, звання) (підпис) (ПІБ)

« ____ » _____ 2025р.

**ЗАВДАННЯ
ДО ВИКОНАННЯ МАГІСТЕРСЬКОЇ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ
СТУДЕНТУ**

Опанасенку Олександрю Анатолійовичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

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

Освітня програма Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
(назва)

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

Тема магістерської кваліфікаційної роботи «Дослідження режимів роботи автоматичного
вимикача живлення низької напруги»

затверджена наказом ректора Національного університету біоресурсів і
природокористування України від 06.03.2024 р. № 324 «С»

Термін подання завершеної роботи на кафедру 2025.11.13.
(рік, місяць, число)

Вихідні дані до магістерської кваліфікаційної роботи каталоги фірм з електромагнітними
контакторами, методичні рекомендації

Перелік питань, що підлягають дослідженню:

- 1) Аналіз електромагнітних систем сучасних низьковольтних контакторів.
- 2) Розрахунок складових електромагнітних контакторів.
- 3) Моделювання електромагнітних полів в середині електромагнітної системи контакторів.
- 4) Особливості розподілу електромагнітного поля в котушках електромагнітних контакторів.
- 5) Правила техніки безпеки при монтажі електромагнітних контакторів.

Дата видачі завдання 06.03.2024 р.

Керівник магістерської кваліфікаційної роботи

к.т.н., доцент _____ Сорокін Д.С.
(науковий ступінь та вчене звання) (підпис) (ПІБ)

Виконав _____ Опанасенко О.А.
(підпис) (ПІБ)

РЕФЕРАТ

Опанасенко О.А. «Дослідження режимів роботи автоматичного вимикача живлення низької напруги» (магістерська кваліфікаційна робота, Київ, Національний університет біоресурсів і природокористування України, 2025 р.).

Пояснювальна записка: 83 сторінки, 8 таблиць, 13 малюнків, 16 використаних джерел.

У дипломній роботі розглянуто актуальні питання контролю і розподілу електричної енергії в системах електропостачання, зокрема моделювання режимів роботи автоматичних вимикачів, оцінки їх електромагнітних і механічних характеристик та впливу на надійність енергетичних систем. Наведено вступ, обґрунтовано актуальність теми, визначено мету, об'єкт, предмет та завдання дослідження.

У розділі 1 проведено аналіз сучасних автоматичних вимикачів, комутаційних пристроїв та їх конструктивних особливостей, включно з вимикачами навантаження, високовольтними вимикачами та роз'єднувачами. Розглянуто класифікацію вимикачів за призначенням, ступенем напруги та частотою комутацій.

У розділі 2 описано фізичні механізми роботи автоматичних вимикачів: електромагнітне спрацьовування, вплив індуктивних і ємнісних компонентів мережі, утворення вихрових струмів і магнітних полів у контактах та сердечниках, а також методику розрахунку часу спрацювання і струмових характеристик.

У розділі 3 проведено моделювання режимів роботи автоматичних вимикачів у різних схемах електропостачання, визначено вплив механічних параметрів (пружини, плунжери, фіксатори) та електричних характеристик (струм, напруга, індуктивність) на час спрацювання та надійність комутації. Наведено порівняння результатів для різних типів вимикачів і умов експлуатації.

У розділі 4 проаналізовано практичні аспекти експлуатації вимикачів: планування технічного обслуговування, профілактичний контроль, вплив режимів роботи на довговічність механічних і електричних компонентів, а також організаційні та технічні заходи з безпеки при роботі в електроустановках.

У розділі 5 наведено рекомендації щодо оптимізації режимів роботи автоматичних вимикачів, що дозволяють зменшити втрати енергії, підвищити надійність роботи та продовжити термін служби обладнання: застосування моделювання для прогнозування критичних режимів, контроль температурного і механічного стану контактів, інтеграція вимикачів у системи автоматизації та дистанційного моніторингу.

За результатами досліджень зроблено висновки, що моделювання режимів роботи автоматичних вимикачів дозволяє підвищити ефективність систем електропостачання, враховувати взаємодію електричних і механічних процесів, забезпечувати безпеку експлуатації та оптимізувати технічне обслуговування.

Ключові слова: АВТОМАТИЧНИЙ ВИМИКАЧ, КОМУТАЦІЙНИЙ ПРИСТРІЙ, МОДЕЛЮВАННЯ РЕЖИМІВ, ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ ПРОЦЕСИ, НАДІЙНІСТЬ, ТЕХНІЧНЕ ОБСЛУГОВУВАННЯ.

ЗМІСТ

РЕФЕРАТ	4
ВСТУП	7
1. ОГЛЯД КОНСТРУКЦІЇ ВИМИКАЧІВ	11
1.1 Принцип дії автоматичного вимикача	11
1.2 Конструкція та основні характеристики автоматичних вимикачів .	13
1.3 Вибір автоматичних вимикачів	38
2. РЕЖИМИ РОБОТИ АВТОМАТИЧНИХ ВИМИКАЧІВ ЖИВЛЕННЯ	42
2.1 Постановка задачі	42
2.2 Моделювання у програмному комплексі COMSOL Multiphysics....	46
3. РЕЗУЛЬТАТИ МОДЕЛЮВАННЯ.....	49
4. ОБСЛУГОВУВАННЯ І РЕМОНТ ЕНЕРГЕТИЧНОГО ОБЛАДНАННЯ	58
4.1 Організація монтажу і експлуатація енергообладнання	58
4.2 Розрахунок об'єму робіт по обслуговування енергетичного обладнання.	60
4.3. Розрахунок річних працезатрат на виконання ТО енергетичного обладнання пункту технічного обслуговування і діагностування енергетичного обладнання	61
5. БЕЗПЕКА ПРАЦІ.....	64
5.1 Загальні положення.....	64
5.2 Ступені небезпеки роботи в електроустановках	66
5.3 Аналіз небезпечних та шкідливих виробничих чинників при роботі за комп'ютером.....	68
5.4 Інженерно-технічні заходи з охорони праці	70
5.5 Пожежна профілактика	73
ВИСНОВКИ.....	75
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	77

ВСТУП

Електрифікація залишається фундаментальною умовою сучасного технологічного прогресу. Використання електроенергії у промисловості, сільському господарстві, транспорті та в побуті значно підвищує рівень механізації та автоматизації, дозволяючи забезпечувати високу продуктивність, надійність і ефективність систем. Безперебійне та якісне електропостачання - це критичний компонент енергетичної інфраструктури: будь-які відхилення в роботі електричної мережі (перенапруга, недовантаження, перевантаження або короткі замикання) можуть призвести до серйозних наслідків - від пошкодження обладнання до збоїв у роботі технологічних процесів.

Однією з ключових складових систем захисту низьковольтних електричних мереж є автоматичні вимикачі. Вони виконують наступні функції: автоматичне відключення кола при перевищенні граничних струмів (короткі замикання, перевантаження), забезпечення селективного захисту, можливість повторного включення після аварій та участі у схемах автоматизації. Використовуються вимикачі з тепловими, електромагнітними або комбінованими розчіплювачами, а також різною кількістю полюсів - залежно від конфігурації мережі (однофазна чи трифазна) та характеру навантаження.

Актуальність теми

Зростання складності сучасних електричних мереж і зростаючі вимоги до захисту

У сучасних енергосистемах низьковольтні кола все частіше стикаються з аномальними режимами - перевантаженням, короткими замиканнями, коливанням напруги тощо. Це зумовлює підвищену ймовірність відключень, пошкодження обладнання та зниження надійності системи. Автоматичні вимикачі часто мають обмежену селективність через однаковий час вимикання, що не дозволяє ефективно координувати захист.

Розвиток «розумних» апаратів захисту

Сучасні низьковольтні апарати захисту містять електронні та мікропроцесорні компоненти, що дають змогу реалізувати додаткові функції: регулювання уставок струму чи часу, автоматичне повторне вмикання, віддалене керування через комунікаційні модулі (наприклад, Wi-Fi).

Це відкриває нові можливості для адаптивного захисту, але водночас вимагає глибшого вивчення режимів їх роботи, особливо в умовах різноманітних аварійних і перехідних процесів.

Захист побутових і комерційних споживачів

Особливо актуальним є забезпечення захисту однофазних споживачів від недопустимих відхилень напруги (перенапруг або нестачі напруги) в трифазних системах з глухозаземленою нейтраллю. Наприклад, в дослідженні “Удосконалення захисних характеристик ... реле контролю напруги” доведено, що в таких системах може відбуватися значна чутливість побутового обладнання до стрибків напруги.

Відновлювана енергетика та автономні системи

З поширенням відновлюваних джерел енергії, таких як сонячні панелі або вітрові установки, а також автономних мікромереж, змінюються умови роботи низьковольтних розподільних систем: часті трансїєнти, мікровідключення, нестабільні режими. Це вимагає гнучких комутаційних апаратів, здатних реагувати на широкий спектр оперативних режимів.

Безпека та надійність

Відмова автоматичного вимикача в критичний момент може призвести до аварійних ситуацій, що створює ризики для обладнання, людей та інфраструктури. Водночас надмірно консервативні захисні налаштування (високі уставки, повільне спрацювання) знижують чутливість системи, що може спричинити недозахист або зволікання при аваріях. Тому дослідження режимів роботи автоматичного вимикача й оптимізація його характеристик має важливе практичне значення.

Наукова новизна та практичне значення

Дослідження режимів роботи АВ (автоматичного вимикача) в різних умовах - нормальних, аварійних, післяаварійних - відкриває можливість розробки оптимальних алгоритмів спрацьовування, селективних захистів та стратегій повторного включення. Це, у свою чергу, сприяє підвищенню надійності, продуктивності й безпеки електричних мереж.

Огляд літератури

У наукових працях останніх років значну увагу приділяють саме темі захисту та автоматики в низьковольтних мережах.

У дослідженні, пов'язаному з диференціальними схемами та мікропроцесорними реле контролю напруги (РКН), показано, що можливість налаштування уставок за часом і струмом дає значні переваги в підвищенні чутливості та селективності захисту.

У методичних вказівках для лабораторних досліджень АПВ- пристроїв (автоматичного повторного вмикання) розглядаються режими відключення і повторного включення, зокрема важливість часу зворотнього вмикання та кількості операцій, необхідних для гашення дуги.

В наукових оглядах українських навчально- наукових інститутів (наприклад, НУБіП) підкреслюється обмеження селективності традиційних автоматичних вимикачів і необхідність впровадження більш гнучких пристроїв захисту в низьковольтних мережах.

Крім того, в дисертаціях дослідники комбінують моделювання роботи розподільних мереж з автоматичними пристроями регулювання напруги та захисту, що дозволяє аналізувати як нормальні, так і аварійні режими.

Метою дипломної роботи є комплексне дослідження режимів роботи автоматичного вимикача живлення низької напруги та визначення оптимальних налаштувань для забезпечення надійного, безпечного та ефективного функціонування низьковольтних електричних мереж.

Об'єкт дослідження

Об'єктом дослідження є автоматичні вимикачі живлення низької напруги та їх робота в електричних мережах різної конфігурації.

Предмет дослідження

Предметом дослідження є режими роботи автоматичних вимикачів низької напруги та вплив налаштувань уставок струму та часу на їх селективність, швидкість спрацьовування та надійність захисту мережі.

Завдання дослідження

Для досягнення мети поставлено наступні завдання:

Розробити математичну та/або симуляційну модель автоматичного вимикача, яка враховує теплові, електромагнітні та комбіновані розчіплювачі.

Проаналізувати поведінку вимикача в різних режимах роботи, зокрема: нормальному, перевантаження, короткого замикання та післяаварійного повторного включення.

Оцінити вплив налаштувань уставок струму та часу на селективність захисту та надійність роботи мережі.

Запропонувати оптимальні конфігурації налаштувань для забезпечення балансу між чутливістю, швидкістю спрацьовування та безпекою.

Дослідити можливості впровадження мікропроцесорних рішень для розширеного контролю та діагностики стану автоматичного вимикача.

1. ОГЛЯД КОНСТРУКЦІЇ ВИМИКАЧІВ

1.1 Принцип дії автоматичного вимикача

Автоматичний вимикач є одним із основних комутаційних апаратів низьковольтних електричних мереж, що забезпечує їх захист від перевантажень, коротких замикань та інших аварійних режимів.

Електромагнітний принцип дії автоматичного вимикача базується на використанні електромагніту з тригерним механізмом, який миттєво спрацьовує при перевищенні допустимого струму. Такий механізм дозволяє вимикачу відключити коло навіть при короткочасних струмах короткого замикання, що гарантує максимальний рівень захисту для чутливих електроприймачів. Час спрацьовування електромагнітного розчіплювача зазвичай складає частки секунди, що робить його надзвичайно ефективним для запобігання пошкодженню обладнання та аварійних ситуацій.

Тепловий розчіплювач автоматичного вимикача працює за принципом нагріву біметалевої пластини під дією струму перевантаження. При перевищенні номінального струму біметал нагрівається, згинається і через механізм спрацьовує відключення кола. Тепловий захист забезпечує надійну роботу у випадках тривалих перевантажень, коли миттєвий електромагнітний захист може бути недостатньо ефективним.

Комбіновані вимикачі об'єднують тепловий та електромагнітний розчіплювачі, що дозволяє забезпечити комплексний захист як від короткочасних струмів короткого замикання, так і від тривалих перевантажень. Така комбінація гарантує не тільки швидке реагування на аварійні стани, але й тривалий контроль за нормальним режимом роботи електромережі.

Основною перевагою автоматичних вимикачів перед запобіжниками є багатофункціональність та зручність експлуатації. На відміну від запобіжника, який після спрацьовування потребує заміни, автоматичний вимикач може бути відновлений до роботи повторним натисканням кнопки

або поворотом ручки після усунення причини аварії. Крім того, автоматичні вимикачі дозволяють не лише захищати мережу, а й керувати електричними колами, здійснювати планове включення та відключення навантажень, а також забезпечують можливість інтеграції з системами автоматизації та дистанційного управління. Схема схеми такого вимикача наведена в 1.1. На малюнку

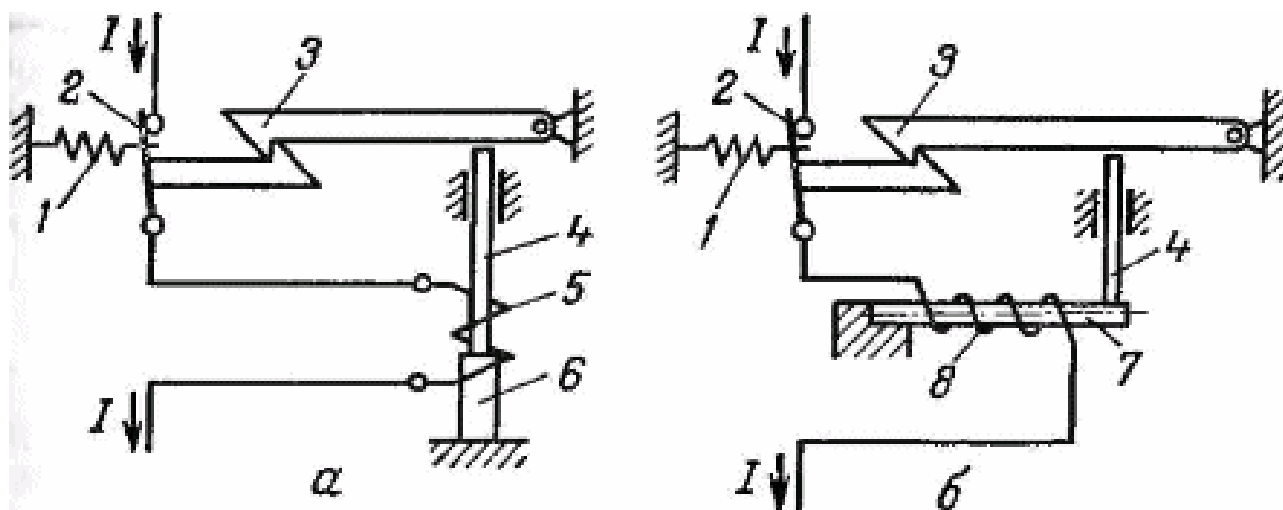


Рис. 1.1 Схема автоматичного вимикача: а – з електромагнітним розчеплювачем; б – з тепловим розчеплювачем.

Основний контакт ланцюга закривається натисканням кнопки або поворотом ручки. Долає зусилля відкриття пружин, і контакт утримується замкнутим засувкою 3. Як тільки струм у захищеному контурі перевищує певне значення, сердечник 6 втягується в котушку 5, а засувка 5 відпускається важелем 4. Відповідно до дії пружини 2 контакти відкриваються. На схемі показаний контакт однієї основної ланцюга, і на практиці їх може бути дві-три, однакове число може бути 5 котушок з 6 ядрами. Всі сердечники після монтажних робіт на одній засувці 3. Потужність збільшення будь-якого проводу (котушки) до величини, що перевищує значення струм напруги означає, що всі основні контакти відкриті.

Електромагніт з тригерним механізмом називається електромагнітним тригером. Електромагнітні вимикачі мають незначний час пуску (частки

секунди) і тому належать до пристроїв, що забезпечують максимальний захист для негайної роботи.

Сучасні автоматичні вимикачі часто обладнані механізмами селективного спрацювання, що дозволяє координувати їх роботу у розподільних мережах різної конфігурації, а також додатковими електронними або мікропроцесорними модулями, що забезпечують контроль стану, дистанційне керування та діагностику роботи мережі. Завдяки цьому вони не тільки підвищують безпеку та надійність системи, а й зменшують час простою та витрати на обслуговування.

1.2 Конструкція та основні характеристики автоматичних вимикачів

У низьковольтних мережах з номінальною напругою 0,4 кВ вибір автоматичних вимикачів, захисних пристроїв та ліній електропередачі є взаємопов'язаним і повинен ґрунтуватися на дотриманні нормальної роботи електричної системи, умов експлуатації обладнання та безпеки персоналу. При цьому основні параметри вибору включають:

Номінальна напруга та струм обладнання

Вибір автоматичних вимикачів здійснюється відповідно до номінальної напруги мережі та тривалого номінального струму навантаження. Струм живлення повинен відповідати тривалому режиму роботи підключених електроприймачів, що забезпечує стабільну роботу мережі в нормальних умовах.

Опір короткого замикання та захист від аварійних режимів

Всі обладнання та провідники мережі повинні бути стійкими до теплового та механічного впливу струмів короткого замикання. Автоматичні вимикачі повинні забезпечувати надійне відключення розрахованих струмів короткого замикання, запобігаючи пошкодженню ліній та електроприймачів.

Захист від усіх типів коротких замикань

Вимикачі повинні чутливо реагувати на будь-які короткі замикання, що виникають у кінці захищеної зони. Для цього рекомендується використовувати вимикачі з комбінованим розчіплювачем, який забезпечує ефективну селективність (відключення лише пошкодженої ділянки) та швидке реагування. Таке рішення забезпечує:

- мінімальний тепловий вплив на обладнання;
 - скорочення часу перерви в електропостачанні;
 - полегшення повторного автоматичного пуску електродвигунів;
 - підвищення безпеки обслуговуючого персоналу.
- Захист від аномальних режимів та перевантажень

Автоматичні вимикачі забезпечують захист від тривалих перевантажень електродвигунів і електричних ланцюгів, які виникають через технологічні процеси або особливості експлуатації мережі. Водночас вони не повинні відключати ланцюг під час пуску або автоматичного запуску обладнання, що забезпечує безперервність технологічного процесу.

Принцип дії

Тепловий розчіплювач: захист від перевантаження здійснюється біметалічною пластиною, яка під дією струму перевантаження нагрівається, згинається та через механізм спрацьовує відключення.

Електромагнітний розчіплювач: складається з котушки, сердечника та пружини. Струм короткого замикання створює електромагнітну силу, яка переміщує сердечник, стискає пружину і активує механізм відключення.

Комбіновані розчіплювачі: поєднують тепловий та електромагнітний захист, забезпечуючи комплексну реакцію на перевантаження та коротке замикання.

Напівпровідникові та мікропроцесорні виходи: забезпечують додаткові функції, такі як віддалене відключення, захист від пониження напруги (нульове або мінімальне вивільнення), контроль та діагностика стану вимикача.

Конструктивні особливості та кількість полюсів

Кількість полюсів вимикача залежить від типу мережі:

Однополюсні - для однофазних мереж;

Двополюсні - для однофазних спільних ліній або нейтралі;

Триполюсні - для трифазних мереж.

Однополюсний вимикач з комбінованим механізмом складається з таких основних компонентів: корпусу, контактної системи, розчіплювача, важелів керування та індикаторів стану. У трифазних конструкціях ці елементи повторюються для кожної фази, а механізм спрацьовування забезпечує одночасне відключення всіх полюсів при аварійних режимах.

Додаткові функції сучасних автоматичних вимикачів

Селективність - забезпечує відключення тільки пошкодженої ділянки мережі;

Швидкість спрацьовування - гарантує короткочасне впливання струмів короткого замикання;

Вбудована індикація стану - візуальне або дистанційне відображення режиму роботи;

Можливість дистанційного керування та інтеграції з системами автоматизації;

Модульна конструкція - дозволяє легко замінювати або модернізувати окремі компоненти, не зупиняючи всю систему.

Таким чином, автоматичні вимикачі не лише забезпечують надійний захист електричних мереж, а й підвищують ефективність експлуатації, зручність обслуговування та безпеку персоналу, що робить їх незамінними у сучасних системах електропостачання.

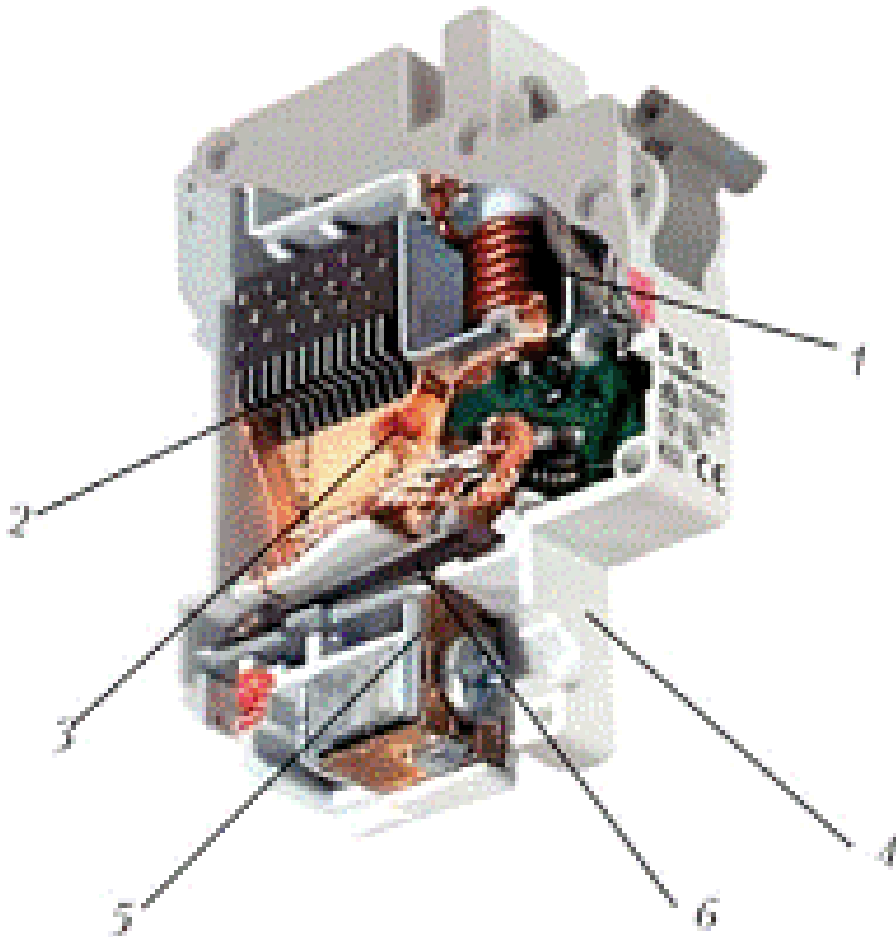


Рис. 1.2 Будова автоматичного вимикача

- максимальний викид електромагнітного струму (1), який представляє собою електромагніт із перемичкою, забезпечує автоматичне відключення вимикача при струмах короткого замикання, що перевищують задане значення струму;

- пристрій гасіння дуги (2), встановлене до кожного полюса вимикача і призначене для виявлення обмеженої кількості електричних ланцюгів. Це твердісна камера з діонною решіткою із сталевих пластин. Також можуть бути іскрові розрядники, які є ДВП;

- Контактна система (3), що складається з нерухомих контактів, встановлених в корпусі, і рухомих контактів, які шарнірно розташовані на валу валу управління і зазвичай забезпечують один розрив ланцюга.

- Корпуса (4);

- Клем підключення (5);

- Теплового розщеплювача (6), що представляє собою термо біметалеву пластину. При струмах перевантаження деформація та зусилля цієї пластини забезпечують автоматичне відключення вимикача. Витримка часу відбувається із зростанням струму.

Напівпровідникові (твердотільні) розподільники є сучасним рішенням для керування та захисту електричних мереж. Вони складаються з трьох основних елементів:

Вимірювальний елемент - трансформатор струму для мереж змінного струму або магнітний дросель для мереж постійного струму, який забезпечує безперервне відстеження величини струму в колі.

Напівпровідникове реле блоку - перетворює сигнал від вимірювального елемента та формує команду для спрацювання захисного механізму.

Вихідний електромагніт - діє на механізм відключення вимикача, активуючи його тригер та забезпечуючи миттєве розмикання кола у разі аварійного режиму.

Твердотільні розподільники дозволяють гнучко налаштовувати параметри захисту автоматичного вимикача:

Номінальний струм спрацювання розщеплювача - визначає межу, при якій спрацює тепловий або електромагнітний захист.

Уставки по струму в зоні короткого замикання (струм відсічення) - забезпечують миттєве відключення при небезпечних струмах.

Уставки за часом у зоні перевантаження - регулюють тривалість спрацювання при перевищенні номінального струму, запобігаючи небажаному відключенню під час короткочасного перевантаження.

Уставки за часом у зоні короткого замикання - застосовуються для забезпечення селективності у випадку багатоетапного захисту в мережі.

Система працює за принципом: сигнал від вимірювального пристрою надходить на проміжне реле, яке передає команду на незалежний тригер, а той активує механізм відключення. Це дозволяє точно регулювати

характеристики захисту та час спрацювання вимикача, підвищуючи надійність і безпеку мережі.

Класифікація автоматичних вимикачів за режимами роботи

Автоматичні вимикачі, що використовують твердотільні або класичні механізми, поділяються на:

Обмежувальні - такі вимикачі не обмежують струм короткого замикання до початку спрацювання, тобто струм у колі досягає максимального очікуваного значення. Вони забезпечують швидке відключення, але не регулюють пікову величину струму.

Стумові - ці вимикачі обмежують величину струму короткого замикання шляхом швидкого введення додаткового опору в дуговий розряд, завдяки чому струм не досягає максимально очікуваного значення.

Незалежно від типу виконуваних функцій, автоматичні вимикачі можна класифікувати за швидкістю спрацювання:

Миттєві - спрацювають за частки секунди, застосовуються для коротких замикань.

З часовою витримкою - реагують на тривалі перевантаження, забезпечуючи комплексний захист мережі без зайвого відключення під час нормальної роботи.

Таке поєднання твердотільних розподільників та механічних або електромагнітних розчіплювачів забезпечує гнучке керування захистом, дозволяє точно налаштувати уставки струму та часу, підвищує селективність, надійність та безпеку експлуатації низьковольтних мереж.

(Увімкнено час від видачі команди до початку відкриття контактів):

- Нормальні ($t_{e.c.} = 0,02...0,1$ с);
- Селективні ($t_{e.c.}$ Регулюється до 1 с);
- Швидкодіючі, що володіють струмообмежуючим ефектом ($t_{e.c.}$ не більше 0,05 с).

Номінальним струмом (I_{HA}) і напругою (U_{HA}) автоматичного вимикача називають значення струму і напруги, які здатні витримувати головні струмопровідні частини автомата в тривалому режимі.

Номінальний струм розчеплювача обирається за умовами:

$$I_{HP} = 1,25I_{HD} - \text{для лінії з одним ЕД}; \quad (1.1)$$

де I_{HD} - номінальний струм електродвигуна;

$I_{HP} = 1,1I_M$ - для лінії з декількома ЕД, де I_M - максимальний струм в лінії з декількома ЕД.

Струм спрацювання електромагнітного розчеплювача ($I_{уем}$) або струм спрацювання в зоні струмів КЗ з витримкою часу ($I_{укзв}$), для селективних вимикачів, вибирається по умові чутливості до найменшого струму КЗ в зоні захисту ($I_{КЗ} > I_{уем}$) відбудови від пускових струмів ($I_{уем} > I_{удп}$):

$$I_{КЗ} = I_{уем} > I_{удп} - \text{для лінії з одним ЕД}; \quad (1.2)$$

$$I_{КЗ} = I_{уем} \text{ або } I_{укзв} > 1,2I_{пик} - \text{для лінії з кількома ЕД}, \quad (1.3)$$

$I_{удп}$ - ударний пусковий струм;

$I_{пик}$ - піковий струм групи ЕД (найбільший струм, що виникає в лінії, тривалістю 1-2с);

Електромагнітний струм розряду або струм відключення в зоні струму короткого замикання із затримкою селективних вимикачів приймається як добуток номінального струму розряду

$$I_{уем} \text{ або } I_{укзв} = I_{нр} \quad (1.4)$$

Ток відключення струму відключення теплового відключення (IUT) або струм відключення в зоні струму перевантаження (IUP) для перемикачів з напівпровідниковим виходом приймає номінальний струм виходу

$$I_{ум}, \text{ або } I_{ун} = I_{нр} \quad (1.5)$$

Значення коефіцієнтів наведені в технічних параметрах вимикачів. Випробування вимикачів стартера проводиться відповідно до наступних умов:

$$I_{кз} \leq n_{кс} \text{ або } I_{кз} < I_{cs} \quad (1.6)$$

Гранична комутаційна здатність (I_s) та пов'язані характеристики

Гранична комутаційна здатність - це максимальний струм короткого замикання, при відключенні якого автоматичний вимикач (автомат) зберігає свою працездатність після спрацьовування. Іноді її позначають як I_s або I_{cs} , залежно від виробника чи нормативного документу.

Одноразова гранична комутаційна здатність - це максимальний струм КЗ, який автомат може відключити лише один раз, після чого він, як правило, втрачає свою функціональність і потребує заміни або капітального ремонту. Ця величина зазвичай позначається як I_{CU} (або I_{cu}).

Значення ПКС (I_{cs}) та ОПКС (I_{cu}) повинні відповідати максимальному очікуваному струму короткого замикання в тій точці мережі, де встановлено автоматичний вимикач.

Ці характеристики проєктуються відповідно до умов мережі та розрахункового струму короткого замикання за відсутності обмеження - тобто, максимальної теоретичної величини струму, яка може виникнути без роботи струмообмежуючих пристроїв.

Стійкість при комутації: електродинамічна та термічна

Після того, як автомат вимикає струм короткого замикання, важливо, щоб він залишався в працездатному стані, не отримавши пошкоджень контактів або механізму. Для цього існують два види стійкості:

Електродинамічна стійкість

Характеризується максимальною амплітудою струму перенапруги (або імпульсу), яку вимикач може витримати без постійної деформації контактів, їх «приварювання» (зварювання) або інших пошкоджень.

Якщо в каталозі виробника не вказано електродинамічну стійкість, це може означати, що її гарантує сама комутаційна здатність (ПКС / I_{cs}), або що вона є „автоматичною умовою“ відповідно до випробувань виробника.

Термічна стійкість

Оцінюється за так званим джоулевым інтегралом (I^2t), який показує, скільки тепла виділяється за час дії струму.

У технічних характеристиках вимикача ця стійкість часто задається в “кА²·с” - це показник, який вказує, наскільки великий струм короткого замикання може витримати апарат, перш ніж перегрітися або пошкодитися.

Якщо каталог не містить значення термічної стійкості, це може означати, що виробник вважає вимикач „термічно стійким“, тобто він розрахований на такі умови роботи, що не допускають термічне пошкодження або, іншими словами, має достатній запас за температурою.

Вибірковість (селективність) захисту

При проектуванні захисту мережі дуже важливо, щоб автоматичні вимикачі, підключені один за одним (наприклад, ввідний та ланковий), працювали селективно:

Селективність забезпечується тоді, коли під час короткого замикання спрацьовує лише той вимикач, який ближче до пошкодження, а не весь ланцюг (ввідний вимикач не повинен реагувати, якщо пошкоджена лише частина мережі).

Для забезпечення селективності використовують вимикачі з часовою витримкою: нижчестоящий вимикач повинний спрацювати раніше, ніж ввідний.

При цьому вибірковість перевіряють, аналізуючи часові та струмові характеристики (криві I–t) вимикачів: їхні характеристики не мають перетинатися в робочих зонах, або перетин має бути таким, щоб глибина селективності була забезпечена.

Класи струму - характеристики часу / струму

Автоматичні вимикачі можуть мати різні типи часових / струмових характеристик:

Залежні від струму характеристики - такі вимикачі мають лише тепловий захист і спрацьовують залежно від перевантаження по струму (час підігріву біметалу).

Незалежні струмові характеристики - спрацьовування відбувається електромагнітним (або іншим механізмом), незалежно від класу часу:

обмежені характеристики струму - обмежують струм короткого замикання (струм не досягає свого максимуму);

з часовою витримкою:

в зоні перевантаження - затримка спрацьовування (щоб не відключати під час короткочасних пікових навантажень);

в зоні короткого замикання - залежно від конструкції: або миттєве відключення (без затримки), або затримка за струмом (для селективності).

Використовувані типи розчіплювачів

Автоматичні вимикачі можуть бути оснащені класичними або сучасними механізмами спрацьовування: комбіновані розчіплювачі (тепловий + електромагнітний), або напівпровідникові блоки (з мікропроцесорним або синтезованим управлінням), що дає можливість налаштувати захист більш гнучко, задаючи точні уставки струму й часу.

Існує також багатоступенева (наприклад, триступенева) характеристика, коли вимикач має окремі режими спрацьовування для різних типів навантажень або аварій (наприклад, перевантаження, мінімальні струми, коротке замикання).

у зоні струму перевантаження вимикач вимикається із затримкою в часі залежно від часу в зоні струму кЗ. - з незалежною, встановленою швидкістю витримки (селективна зона обрізки) та закриття. З. - без часового опору (зона негайної дії); вимикач має напівпровідниковий випуск.

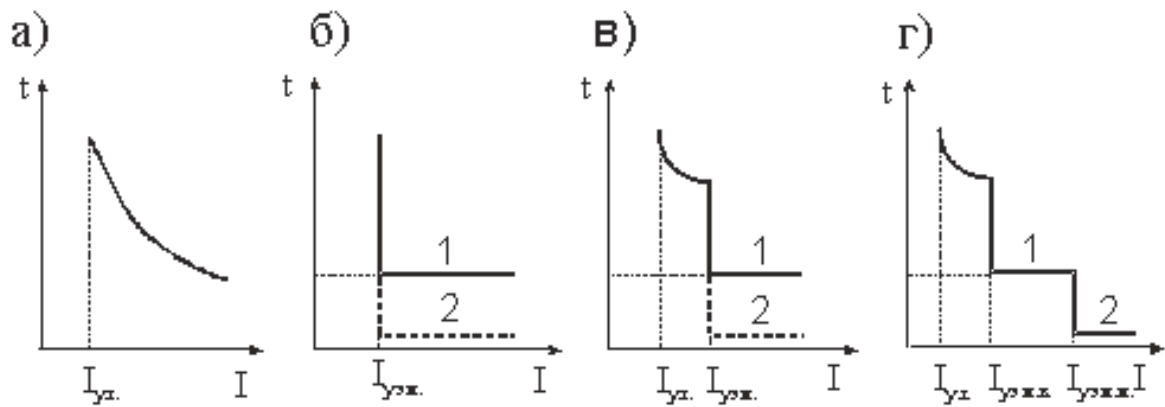


Рис.1.3. Часострумкові характеристики автоматичних вимикачів: а - залежна; б - незалежна; в - обмежень залежна; г - триступенева. 1 - з витримкою часу при к. З.; 2 - без витримки часу при к. З.

Напівпровідникові (електронні) розчеплювачі та принцип їх роботи

Напівпровідникові розподільники, які також називають електронними розчеплювачами, входять до складу сучасних автоматичних вимикачів середнього та високого класу. Вони забезпечують точний, регульований та швидкий захист електричних мереж від перевантаження та коротких замикань.

Такий розчеплювач складається з трьох основних частин:

Вимірювального елемента

Для кола змінного струму застосовують трансформатор струму (ТС).

Для кола постійного струму використовується магнітний дросель або шунт.

Ці елементи знімають реальний струм навантаження та перетворюють його на сигнал для електронного модуля.

Блоку напівпровідникової (електронної) логіки

Це мікропроцесорний або аналоговий модуль, який:

порівнює струм з уставками,

визначає перевантаження та коротке замикання,

формує керуючий сигнал на вимкнення.

Вихідного електромагніту / соленоїда

Він отримує команду від електронного модуля та фізично впливає на механізм вільного розчеплення, що миттєво вимикає автоматичний вимикач.

Можливості та регулювання напівпровідникових розчеплювачів

Електронні розчеплювачі дозволяють точно налаштувати:

Номінальний струм розчеплювача

Встановлюється відповідно до навантаження або кабелю.

Струм відсічення (електромагнітний захист)

Використовується в зоні струмів короткого замикання.

Дозволяє задати, при якому рівні I_{kz} автомат вимкнеться без затримки.

Час спрацювання в зоні перевантаження

Забезпечує тепловий захист з витримкою часу (затримкою).

Час спрацювання в зоні короткого замикання (для селективних вимикачів)

Дає можливість встановити селективність, тобто затримку, яка гарантує, що першими вимкнуться автомати ближче до місця аварії.

Принцип роботи автомата з електронним розчеплювачем

Вимірвальний елемент фіксує струм у реальному часі.

Дані передаються в електронний блок, де вони порівнюються з заданими уставками.

Якщо виникає:

перевантаження → модуль запускає таймер витримки часу;

коротке замикання → формується миттєвий імпульс;

Сигнал подається на електромагніт або проміжне реле.

Реле впливає на механізм вільного розчеплення, після чого контакти автомата розмикаються.

Після усунення причини аварії автомат можна знову ввімкнути вручну.

Класифікація автоматичних вимикачів за обмеженням струму КЗ

Автомати поділяються на два типи:

1. Необмежувальні (струмові) вимикачі

Не впливають на форму струму короткого замикання.

Струм досягає свого пікового значення, визначеного параметрами мережі.

Підходять для простих побутових і невеликих промислових мереж.

2. Обмежувальні вимикачі

Призначені для зменшення амплітуди струму короткого замикання.

Завдяки швидкому гасінню дуги та введенню додаткового опору дуги, струм не встигає досягти максимального значення.

Переваги:

менше теплове та динамічне навантаження на кабелі та обладнання;

підвищена безпека;

можливість використовувати економнішу апаратуру з меншою короткочасною стійкістю.

Класифікація вимикачів за часом спрацювання

Незалежно від типу розчеплювача автомати поділяють на:

Миттєвої дії (електромагнітні)

- спрацьовують при короткому замиканні за мілісекунди.

З витримкою часу (теплові або електронні)

- працюють у зоні перевантаження.

Селективні (тип S)

- мають додаткову затримку для забезпечення правильного поділу відповідальності між ланками мережі.

Вимикачі використовуються не тільки для відключення навантаження при струмі короткого замикання, але і для нормальної роботи, рідко включаються та вимикаються вручну. Коли ланцюг відкрита, електрична дуга згасає в повітрі або маслі. Залежно від цього вимикачі називаються повітряними або масляними. Повітряні вимикачі в основному використовуються в мережах до 500 В.

Захисні властивості електромагнітних вимикачів поділяються на кілька типів (табл. 1.1).

Таблиця 1.1

Типи захисних характеристик автоматичних вимикачів

Тип захисної характеристики	Кратність струму спрацювання при температурі +30 °С	Сфера застосування вимикача
Z	$(2,4 - 3,6)I_n$	Електроустановки зі значною протяжністю електропроводки (малі струми короткого замикання), а також для захисту напівпровідникових приладів
B	$(3 - 5)I_n$	Електроустановки, що не мають значних пускових струмів, зокрема електропроводки жилих будинків
C	$5 - 10)I_n$	Електроустановки з „ударним” навантаженням, (багатополюсні асинхронні електродвигуни, освітлювальні установки з газорозрядними лампами)
D	$(10 - 20)I_n$	Електроустановки зі значними пусковими струмами (трансформатори, двопольні асинхронні двигуни)

Кратність струму спрацювання розчіплювачів вимикачів, що працюють у мережах постійного струму (ДСТУ ІЕС 60898-2:2005), наступні: у

вимикачів з характеристикою типу В ($4 - 7 I_n$), з характеристикою типу С ($7 - 15$) I_n .

Для окремих типів автоматичних вимикачів числові значення кратностей можуть бути дещо іншими, наприклад: А – ($2 - 3$) I_n , К – ($10 - 16$) I_n , L – ($3 - 4$) I_n , U – ($6 - 9$) I_n .

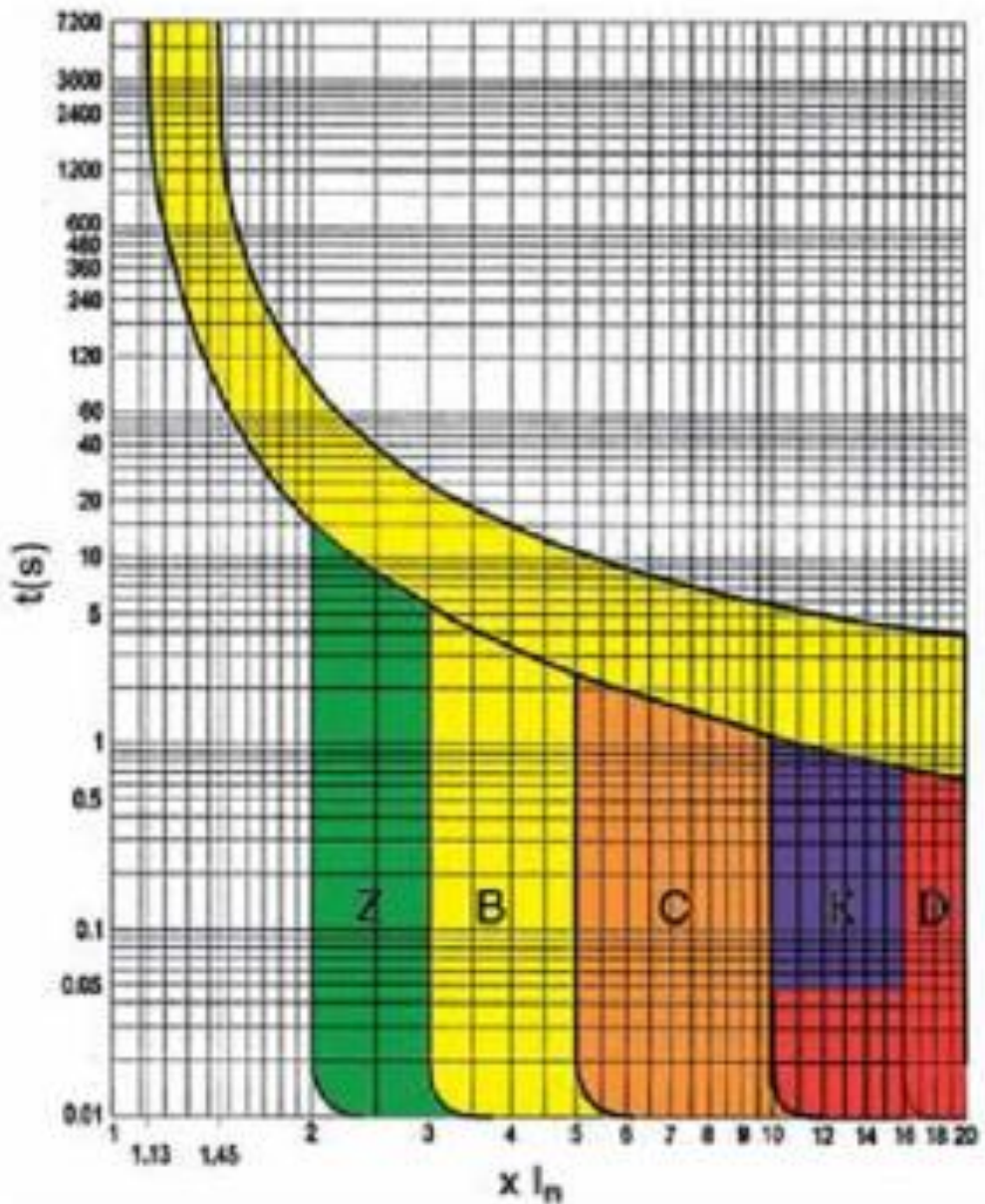


Рис. 1.4 Типові захисні характеристики автоматичних вимикачів $I_n < 10$ А

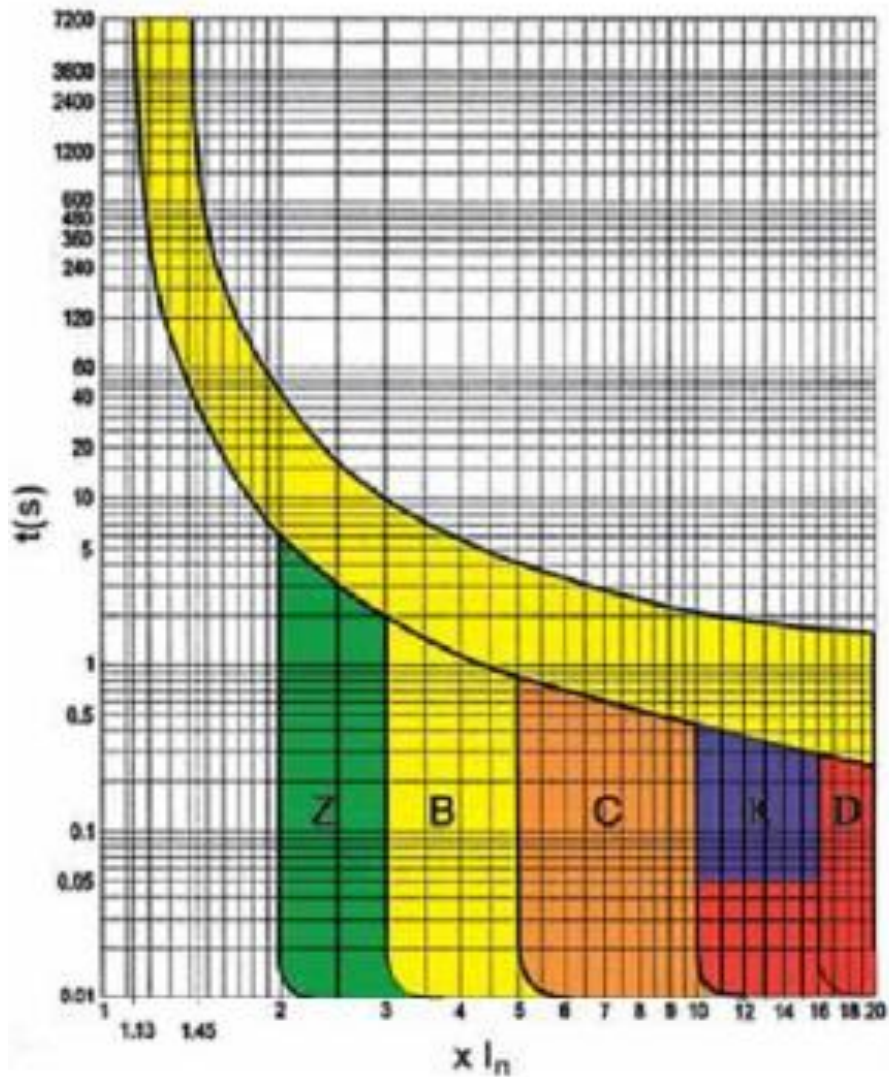


Рис. 1.5 Типові захисні характеристики автоматичних вимикачів $I_n > 10 A$

Стандарт ДСТУ ІЕК 60898-2:2005 (українська адаптація міжнародного ІЕС 60898-2) встановлює технічні вимоги, методи випробувань та параметри, яким повинні відповідати автоматичні вимикачі змінного струму, що застосовуються в побутових, комунальних та аналогічних електроустановках з номінальною частотою 50–60 Гц та номінальними струмами до 125 А.

Одним із ключових положень є часо-струмові характеристики, за якими оцінюють поведінку вимикача при перевантаженнях і коротких замиканнях. У Таблиці 1.2 стандарт встановлює повні діапазони часу спрацювання залежно від кратності струму.

Але, окрім кривих, стандарт регулює значно ширший набір параметрів.

Параметри та характеристики, що регулюються ДСТУ ІЕС 60898-2:2005

Нижче перелічено основні технічні вимоги, які повинні відповідати автоматичні вимикачі згідно зі стандартом.

1. Часо-струмові характеристики (криві В, С, D та інші)

Стандарт встановлює:

діапазони струму, при яких вимикач повинен спрацювати;

мінімальні та максимальні часи спрацювання;

часи неспрацювання (витримки) для запобігання помилковому вимкненню.

Наприклад:

Тип В: спрацює при $3-5 \cdot I_n$

Тип С: $5-10 \cdot I_n$

Тип D: $10-20 \cdot I_n$

Для кожного типу встановлено зони:

неспрацювання за малих кратностей,

спрацювання з витримкою часу,

миттєве електромагнітне спрацювання.

2. Номінальні параметри вимикача

Стандарт визначає допустимі та мінімальні вимоги до:

номінальної напруги U_e

номінального струму I_n (до 125 А)

номінальної частоти

номінальної комутаційної здатності I_{cp} (спроможність вимикати струм

КЗ)

номінальної напруги ізоляції U_i

номінальної імпульсної витримуваної напруги U_{imp}

3. Комутаційні можливості

Стандарт визначає:

Граничну комутаційну здатність (I_{cp})

Максимальний струм короткого замикання, який вимикач може безпечно розірвати.

Умовну комутаційну здатність (I_{cs})

Вимоги для “напівповних” випробувань за наявності запобіжника в колі.

Комутація при перевантаженнях

Перевірка витривалості контактів, нагріву, стабільності характеристики.

4. Теплові та електромагнітні розчеплювачі

Стандарт задає:

пороги спрацювання теплового розчеплювача;

час затримки залежно від кратності струму;

точність і допустиму похибку температурної компенсації;

параметри електромагнітного миттєвого розчеплювача.

5. Електрична та механічна витривалість

Згідно зі стандартом автоматичний вимикач повинен витримати:

не менше 4000 циклів електричної комутації (включення/відключення під навантаженням);

не менше 20 000 механічних циклів роботи.

6. Нагрів та стійкість до перевантажень

ДСТУ ІЕС 60898-2 визначає:

допустимі температурні підйоми на клеммах;

граничне нагрівання струмоведучих частин;

стабільність характеристик після термічних навантажень.

7. Стійкість до коротких замикань

Проводиться перевірка:

термічної стійкості (I^2t)

динамічної стійкості (електродинамічний удар)

стійкості дугогасильної камери

8. Вимоги до конструкції та безпеки

Стандарт встановлює вимоги до:

ступеня захисту корпусу (IP-клас);

захисту від випадкового дотику до струмоведучих частин;

здатності з'єднуватися з мідними та алюмінієвими провідниками;

зусиль затягування клем;

механізму вільного розчеплення (обов'язкова вимога!).

9. Умови експлуатації

Стандарт встановлює:

робочий температурний діапазон вимикача;

вплив вологості та конденсату;

поведінку при перенапругах та імпульсних коливаннях;

роботу в умовах вібрацій та ударів.

10. Маркування та інформація виробника

Обов'язково повинні бути зазначені:

типова серія та модель

номінальний струм I_n

характеристика (B, C, D...)

номінальна комутаційна здатність I_{cn}

номінальна напруга U_e

знак відповідності стандарту

схема підключення

заводські уставки

ДСТУ ІЕС 60898-2:2005 регламентує не лише часо-струмові характеристики, а всю систему вимог до роботи, надійності, точності та безпеки автоматичних вимикачів. Це гарантує, що автомат буде:

правильно захищати мережу,

спрацьовувати лише тоді, коли потрібно,

безпечно розривати струм короткого замикання,

витримувати тисячі циклів роботи,

відповідати загальним параметрам електробезпеки.

Автоматичні вимикачі класифікуються за кількома ознаками: їх функції, кількість полюсів, тип та кількість розрядів, конструкції, способи установки тощо.

За конструкцією вимикачі поділяються на дві групи: шафа з гвинтами (рис. 1.6, а) та модульна, яка встановлюється на стандартній 35-мм рейці (мал. 1.6, б, в).

Завдяки стандартам стандартизованими параметрами комутатора є:

Номінальна та номінальна робоча напруга. Номінальне значення - це найвища напруга мережі, для якої призначений комутатор. Номінальна операція - це напруга мережі, при якій комутатор може працювати.

У вимикачах з основним ланцюгом, а також в ланцюгах управління і сигналізації тривалість напруги цих ланцюгів може бути різною.



а)



б)



в)

Рис. 1.6. Загальний вигляд автоматичних вимикачів у корпусному (а) та модульному: триполюсному (б), і модульному однополюсному (в) виконаннях

Таблиця 1.2

Часо струмові робочі характеристики розчіплювачів максимального струму
автоматичних вимикачів

№ п/п	Тип характеристик	Сила випробувального струму, А		Початковий стан	Межі часу вимкнення та невимкнення	Необхідний результат
		змінного	постійного			
1	B, C, D	$1,13I_n$	-	холодний*)	$t \geq 1$ год (при $I_n \leq 63$ А) $t \geq 2$ год (при $I_n > 63$ А)	невимкнення
2	B, C, D	$1,45I_n$	-	зразу після випробування 1	$t < 1$ год (при $I_n \leq 63$ А) $t < 2$ год (при $I_n > 63$ А)	вимкнення
3	B, C, D	$2,55I_n$	-	холодний	$1 \text{ с} < t < 60 \text{ с}$ (при $I_n \leq 32$ А); $1 \text{ с} < t < 120 \text{ с}$ (при $I_n > 32$ А)	вимкнення
4	B, C	$3I_n$ $5I_n$	$4I_n$ $7I_n$	холодний	$0,1 \text{ с} < t < 45 \text{ с}$ (при $I_n \leq 32$ А); $0,1 \text{ с} < t < 90 \text{ с}$ (при $I_n > 32$ А) $0,1 \text{ с} < t < 15 \text{ с}$ (при $I_n \leq 32$ А); $0,1 \text{ с} < t < 30 \text{ с}$ (при $I_n > 32$ А)	вимкнення
5	B	$5I_n$	$7I_n$ $15I_n$	холодний	$t < 0,1 \text{ с}$	вимкнення
C				$10I_n$		
D		$50I_n$		-		

Номінальна частота живлення Більшість вимикачів розроблені для роботи при 50 та 60 Гц змінного та постійного струму.

Номинальний струм - це струм, що визначається умовами нагріву вимикача в основній конструкції під час роботи в основному номінальному режимі та номінальною напругою.

Номинальний робочий струм - струм, дозволений вимикачем при певних умовах експлуатації, що визначається ступенем захисту від навколишнього середовища, категорією використання, режимом роботи, номінальною напругою мережі.

Номинальний режим роботи. Вимикачі зазвичай розраховані на тривалу роботу.

Категорія додатків. Неселективні комутатори повинні забезпечувати роботу в категоріях застосувань А (АС і DC), АС (АС), DC (DC).

Механічний опір пуску залежить від кількості циклів вмикання / вимикання в ланцюзі відключення без ремонту або заміни його компонентів та деталей.

Опір комутації для операції - це кількість операцій включення і вимикання ланцюга, після яких контакти повинні бути змінені.

Потужність комутації - це обмеження струму, яке може відключити запобіжник при певних значеннях напруги та індуктивності ланцюга.

Клас обмеження енергії - індикатор струму вимикача. Відповідно до цього показника вимикачі поділяються на три класи - 1, 2, 3. Чим вище клас вимикача, тим більше енергії він може передавати і тим менш динамічна робота струму короткого замикання в захищеному ланцюзі.

Стійкість до зовнішніх впливів. До них відносяться механічні фактори (вібрації, удари) та кліматичні фактори навколишнього середовища (кліматичні характеристики пристрою та його категорія розташування).

Автоматичні вимикачі, які застосовуються в електроустановках побутового, комерційного та промислового призначення, повинні повністю відповідати вимогам безпеки, встановленим чинними нормативами України, зокрема стандартами ДСТУ, правилами улаштування електроустановок (ПУЕ), а також вимогами до безпечної експлуатації електрообладнання.

Вимоги електробезпеки

Автоматичні вимикачі повинні забезпечувати:

Захист від ураження електричним струмом

Конструкція має унеможливити випадковий доступ до струмоведучих частин. Корпус повинен відповідати ступеню захисту щонайменше IP20, а в певних умовах – IP40 або вище.

Захист від надмірного нагрівання

Матеріали мають бути термостійкими, негорючими та витримувати вплив нагрівання від струмів навантаження й короткого замикання.

Захист від займання та поширення полум'я

Усі пластикові частини виконуються з матеріалів, що відповідають вимогам самозагасання (категорія V-2, V-1 або V-0 за UL94).

Вільне розчеплення (free trip mechanism)

Ключова вимога безпеки:

вимикач повинен спрацювати незалежно від положення чи утримання рукоятки користувачем, навіть якщо він намагається утримувати її у ввімкненому стані.

2. Вимоги до механічної та електричної міцності

Вимикачі повинні витримувати:

механічні удари та вібрації під час транспортування та роботи;

багаторазові цикли включення/вимкнення;

електричні імпульсні перенапруги (наприклад, від грози або комутацій у мережі);

струмові навантаження, що не перевищують паспортні значення.

Конструкція повинна запобігати:

зварюванню або деформації контактів,

руйнуванню дугогасильної камери,

появі дуги назовні корпусу.

3. Надійність роботи (експлуатаційна надійність)

Надійність роботи автоматичного вимикача визначається його здатністю функціонувати протягом заданого терміну без відмов, зберігаючи конструктивні та струмові характеристики.

До показників надійності належать:

Середній напрацювання до відмови (MTBF)

Вказує, скільки комутацій або годин роботи пристрій може витримати без поломки.

Електрична зносостійкість

Кількість циклів комутації під навантаженням (зазвичай не менше 4000 циклів).

Механічна зносостійкість

Кількість циклів механічного перемикачання без навантаження (не менше 20 000 циклів для якісних вимикачів).

✓ Стабільність характеристик

Параметри спрацювання (B, C, D) не повинні змінюватися в процесі експлуатації.

4. Гарантійні умови та вимоги до експлуатації

Гарантійний термін експлуатації та зберігання автоматичних вимикачів визначається документацією виробника і зазвичай встановлюється за умови:

дотримання температурного режиму

Зазвичай це діапазон від $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+40\text{ }^{\circ}\text{C}$.

нормованої вологості повітря без конденсації.

відсутності агресивного середовища

(пари кислот, лугів, металевого пилу, соляного туману).

правильної установки у відповідних щитових коробках.

правильного вибору перерізу провідників і моменту затягування клем.

Недотримання цих умов може призвести до:

зміни часо-струмової характеристики,

перегріву контактів,
передчасного старіння матеріалів корпусу,
відмови при короткому замиканні.

5. Контроль якості та випробування

Згідно зі стандартами (зокрема, ДСТУ ІЕС 60898-2:2005), автоматичні вимикачі проходять низку обов'язкових випробувань:

на нагрівання;
на електричну міцність ізоляції;
на механічну міцність;
на роботу теплового та електромагнітного розчеплювачів;
на відключення струмів короткого замикання;
на стійкість до вологи та корозії;
на стійкість до дуги та займання.

Лише після успішного проходження всіх випробувань вимикач вважається безпечним для використання.

1.3 Вибір автоматичних вимикачів

Для всіх електричних приймачів номінальний струм розчеплювачів повинен бути

$$I_{н.р} \geq I_{макс} \quad (1.7)$$

де $I_{н.р}$ - номінальний струм розчеплювача, А; $I_{макс}$ - максимальний номінальний струм кола (електроприймача), А.

Правильний вибір автоматичного вимикача повинен забезпечувати як захист проводів і кабелів від перевантаження та короткого замикання, так і коректну роботу підключеного обладнання. Це особливо важливо для мереж із низьким навантаженням та для ланцюгів з електродвигунами, де пускові струми можуть значно перевищувати номінальні.

1. Мережі з низьким навантаженням (освітлення, електротермічні прилади)

Для таких мереж характерні:
невеликі робочі струми, близькі до номінальних значень провідників;
відсутність тривалих високих пускових струмів;
висока чутливість до перевантажень, що може призвести до нагрівання та пошкодження ізоляції.

Рекомендації щодо вибору захисту

Для таких мереж слід використовувати автоматичні вимикачі зі струмом спрацьовування:

не більше 4,5-кратного від максимально допустимого струму навантаження або пропускної здатності проводу.

До таких вимикачів належать:

вимикачі з тепловим розчеплювачем (захищають від перевантаження);

комбіновані вимикачі (тепловий + електромагнітний захист);

вимикачі з електромагнітним розчепленням, налаштовані на спрацьовування приблизно при $5 \cdot I_n$.

Це дозволяє виконати вимогу:

плавний і чутливий захист від перевантаження при збереженні достатньої стійкості до коротких імпульсів струму.

Для низького навантаження найчастіше застосовують характеристики:

Тип В (спрацьовування при $3-5 \cdot I_n$)

Тип С (у рідкісних випадках) - коли є невеликі пускові струми

2. Вибір автоматичних вимикачів для електродвигунів

Електродвигуни - один із найскладніших типів навантаження для комутаційних апаратів. Це пов'язано з тим, що:

пусковий струм (струм холостого пуску) електродвигуна в 5-7 разів перевищує номінальний;

у деяких двигунів (асинхронні з короткозамкнутим ротором) пускові струми можуть досягати $8-10 \cdot I_n$;

пускові струми тривають довше, ніж короткі імпульси, що створює підвищене термічне навантаження.

Особливості вибору автомата для двигуна:

Автомат не повинен спрацьовувати на пусковий струм.

Інакше виникає помилкове відключення при кожному запуску.

Автомат повинен забезпечувати захист від короткого замикання, навіть при високих пускових струмах.

Струм теплового розчеплювача потрібно вибирати таким чином, щоб він не був меншим номінального робочого струму двигуна.

Рекомендовані характеристики для електродвигунів:

Тип С (спрацьовування при $5-10 \cdot I_n$) - підходить для більшості двигунів малої та середньої потужності.

Тип D ($10-20 \cdot I_n$) - для двигунів з високими пусковими струмами, компресорів, насосів, вентиляторів великих розмірів.

Тип К або Z - спеціалізовані та застосовуються у промисловості.

3. Алгоритм вибору автоматичного вимикача для двигуна

Визначити номінальний струм двигуна (I_n).

Визначити кратність пускового струму (зазвичай $5-7 \cdot I_n$).

Вибрати характеристику автомата, що допускає такі струми:

Якщо пусковий струм $\leq 5 \cdot I_n \rightarrow$ тип С може бути недостатнім \rightarrow розглянути тип D.

Якщо пусковий струм $3-5 \cdot I_n \rightarrow$ тип С оптимальний.

Перевірити відсутність селективних конфліктів з розташованими вище за схемою автоматами.

Перевірити теплову стійкість автомата та кабелю.

$I_{e.p}$ Струм відключення електромагнітного розряду повинен бути не менше $1,25$ пускового струму двигуна

$$I_{e.p} \geq 1,25 I_{пуск} \quad (1.8)$$

Для захисту ланцюга двигуна від перевантаження, тобто теплові сепаратори застосовуються у разі пошкодження, спричиненого тривалим надлишковим струмом, прийнятним для нагріву. Одноконтурні схеми в

основному використовують вимикачі з комбінованим тригером. Номінальний вихідний струм задається формулою

$$I_{н.р} \geq bI_n \quad (1.9)$$

де b - коефіцієнт, що дорівнює 1,2 ... 1,25 при важких умовах пуску і рівним 1 при легких умовах пуску.

В схемах з моторною групою в основному слід використовувати вимикачі з електромагнітним відновленням. Значення пускового струму повинно бути більше максимального значення перехідного струму, визначеного сумою номінальних струмів включених найбільших двигунів (споживачів) за умови запуску двигуна при максимальному пусковому струмі:

$$\sum_1^n I_{e.p} \geq I_{кр} \quad (1.10)$$

$$I_{кр} = K_{одн.раб.} nI + I_{пуск.макс} \quad (1.11)$$

де $I_{кр}$ - максимальний короткочасний струм, А; n - число всіх електроприймачів (двигунів); $K_{одн.раб.}$ - коефіцієнт одночасної роботи електричних приймачів (двигунів).

При встановці автоматичних вимикачів із тепловими або комбінованими расцепителями у закритому шафі ток расцепителя може бути

$$I_{н.р} \geq 1,15I_{макс} \quad (1.12)$$

2. РЕЖИМИ РОБОТИ АВТОМАТИЧНИХ ВИМИКАЧІВ ЖИВЛЕННЯ

2.1 Постановка задачі

Такі події, як надмірний струм, коротке замикання або тривале перевантаження, можуть спричинити серйозні пошкодження електричних кіл, ізоляції провідників або обладнання. Одним із найефективніших засобів запобігання цьому є застосування автоматичних вимикачів, які виконують механічне відключення електричного кола при виявленні небезпечного режиму. Їхня робота базується на принципі швидкого розриву контакту під дією електромагнітних або електротеплових сил, що виникають у момент несправності. На відміну від запобіжників, автоматичні вимикачі не потребують заміни після спрацювання - достатньо усунути причину аварії та виконати механічне скидання.

У загальному випадку автоматичні вимикачі класифікують за низкою параметрів:

- номінальна напруга і струм,
- тип вимикальної здатності,
- тип захисту (термічний, електромагнітний, комбінований),
- конструктивні особливості,
- метод гасіння дуги,
- характеристика миттєвого відключення (В, С, D тощо).

Метою моделі, яку розглядаємо, є детальне вивчення принципу роботи електромагнітного вимикача – різновиду електромеханічних захисних пристроїв, у яких перемикавання контакту здійснюється рухомим залізним поршнем (якорем), що переміщується під дією магнітної сили, утвореної струмом у котушці. Такі конструкції також застосовуються в магнітних пускачах, електромагнітних клапанах та інших електромеханічних приводах.

Суть задачі моделювання

Моделювання роботи електромагнітного вимикача потребує врахування взаємодії між трьома фізичними підсистемами:

Електромагнітне поле – визначає магнітну індукцію, силу притягання поршня, поведінку потоків у сердечнику та повітряному проміжку.

Електричні процеси – включають струм у котушці, індуковані струми, опір обмоток, перехідні процеси при подачі/знятті напруги.

Механічна динаміка – рух поршня, сила пружини, тертя, інерційні ефекти, фіксація й спрацювання тригерного механізму.

У моделі враховуються як магнітні сили, так і індукційні ефекти, що виникають при швидкому переміщенні якоря. Важливу роль відіграє жорсткість та попереднє натягнення пружини, які визначають пороговий струм спрацювання та часову затримку реагування.

Геометрія та фізичні параметри моделі

Геометрична конфігурація електромеханічного вузла наведена на рисунку 2.1. Вона складається з:

двох тривимірних E-подібних феромагнітних сердечників, ущільнених у вигляді магнітопроводу;

повітряного зазору, що визначає магнітний опір і характер нелінійності магнітної сили;

мідної котушки на середній ніжці нижнього сердечника, яка генерує магнітне поле;

рухомого верхнього сердечника (якоря/поршня), що утримується в вихідному положенні попередньо натягнутою пружиною.

При протіканні струму котушка створює магнітний потік, що замкнений через обидва E-образні сердечники. Магнітне притягання зростає зі збільшенням струму i , досягнувши порогового значення, долає зусилля пружини. Це викликає прискорений рух поршня та різке замикання повітряного проміжку (спрацювання вимикача).

Ключові аспекти моделювання

Для коректної постановки задачі необхідно врахувати:

Нелінійність магнітних властивостей матеріалу (крива намагнічення В–Н, насичення).

Залежність магнітної сили від положення поршня, площі перерізу та довжини зазору.

Електричні перехідні процеси у котушці при зміні струму:

індукційна складова,

власна індуктивність,

взаємна індуктивність при русі поршня.

Механічну модель руху якоря:

маса та інерція,

демпфування,

сила пружини (лінійна або нелінійна).

Час спрацювання, який критично важливий для вимикачів короткого замикання.

Обмеження та мета дослідження

Метою модельного експерименту є визначення:

часу реагування електромагнітного механізму залежно від струму,

залежності сили притягання від положення поршня,

впливу жорсткості та типу пружини на точку спрацювання,

особливостей замикання повітряного зазору та падіння магнітного опору,

умов переходу від стійкого режиму до спрацювання тригера,

оптимізації конструкції для швидкодії й надійності.

Завдяки такому підходу можна точно передбачити поведінку автоматичного вимикача у реальних умовах та оцінити його відповідність нормативним вимогам (зокрема, часо-струмовим характеристикам, визначеним стандартом ДСТУ ІЕС 60898-2).

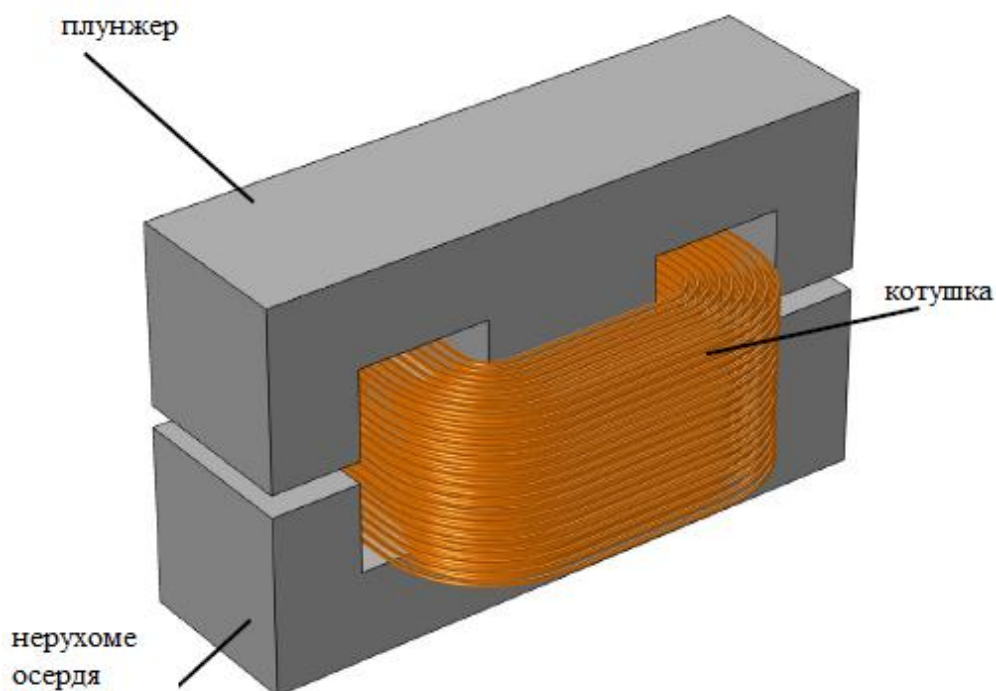


Рис. 2.1 Зовнішній вигляд пристрою

Геометрична модель була створена в середовищі САПР COMSOL Multiphysics із використанням параметричної побудови, що забезпечує гнучке та точне керування розмірами всіх елементів електромеханічного пристрою. Параметризація дозволяє легко змінювати конструктивні величини - товщину сердечників, ширину полюсів, розмір повітряного зазору, число витків котушки тощо - без необхідності повторного проєктування всієї геометрії.

Завдяки наявності площини симетрії достатньо моделювати лише чверть повної конструкції, що значно зменшує обчислювальні витрати та пришвидшує процес симуляції. На рисунку 2.2 наведено геометрію моделі, доповнену набором розмірних параметрів, які вносяться до COMSOL як глобальні або локальні параметри моделі. Це дозволяє швидко проводити варіантні розрахунки, оптимізацію та чутливісний аналіз.

У навколишній повітряний простір інтегровано елемент подачі живлення (термінал збудження), необхідний для формування магнітного поля в котушці та подальшого розрахунку розподілу електромагнітних величин у заданому об'ємі. Повітряна область використовується як робоча

область для визначення магнітних ліній, сил притягання, магнітного опору та впливу переміщення рухомого осердя.

Додатково, у побудованій геометрії враховано:

явні контактні поверхні між рухомим та нерухомим осердям, що важливо для точної оцінки зміни повітряного зазору;

площини обмеження моделі, що задають умови відсутності потоків або симетрії поля;

область навколишнього середовища, що достатньо велика для коректного розрахунку магнітного поля поза магнітопроводом;

можливість подальшого введення деформаційної сітки для врахування переміщення поршня в аналізі «MAGNETOSTATIC + MOVING MESH».

Таким чином, створена параметрична геометрія забезпечує точне відтворення реальної конструкції вимикача та дозволяє проводити повноцінні електромагнітні та електромеханічні розрахунки в COMSOL Multiphysics.

2.2 Моделювання у програмному комплексі COMSOL Multiphysics

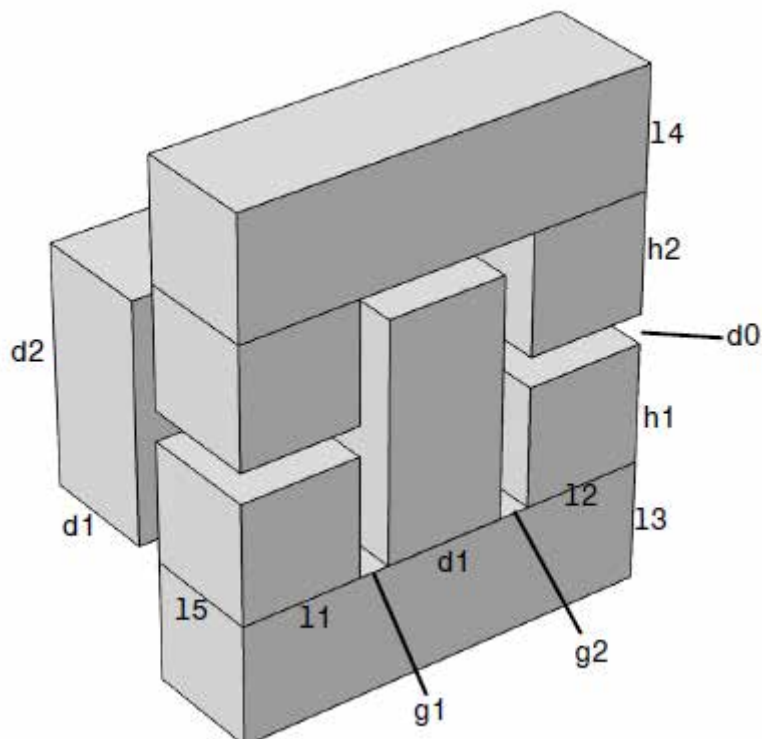


Рис. 2.2 Побудована модель у COMSOL Multiphysics

У даній моделі використано інтерфейс Magnetic Fields, поєднаний із модулем Moving Mesh (ALE), що забезпечує можливість розрахунку електромагнітних полів у геометрії, яка змінює свою форму в часі внаслідок переміщення рухомого осердя та поступового закриття повітряного зазору. Інтерфейс Magnetic Fields виконує розрахунок нестационарного магнітного поля, створеного котушкою, визначає індуквану густину струму, розподіл магнітної індукції та пов'язані з нею ефекти в усіх доменах моделі.

Для електромагнітного збудження застосовано функціонал Coil, який реалізує гомогенізовану багатовиткову модель котушки. Напрямок протікання струму в котушці визначається автоматично на етапі попереднього аналізу її геометрії, що гарантує коректну орієнтацію магнітного поля.

Електромагнітна сила, що діє на рухомий елемент, обчислюється за допомогою функції Force Calculation, після чого передається у вигляді вхідного параметра до рівняння руху плунжера, описаного в інтерфейсі Global ODEs and DAEs. Таким чином, рух поршня моделюється відповідно до другого закону Ньютона із врахуванням маси, демпфування та жорсткості повертальної пружини.

Для підвищення числової стабільності розрахунку, особливо у випадках, коли використовується нелінійна магнітна модель матеріалу сердечників, застосовано лінійні елементи (Linear Elements) для апроксимації векторного магнітного потенціалу. Це знижує ризик розходження рішення та дозволяє уникнути осциляцій у зонах концентрованих магнітних потоків.

Під час роботи вимикача рухомий осердь переміщується строго у вертикальному напрямку, тоді як нижній сердечник залишається фіксованим. У зв'язку з цим повітряний зазор повинен деформуватися плавно та без розривів сітки, тому його геометрія модифікується інтегрованими засобами ALE.

Щоб запобігти повному виродженню сітки в повітряному проміжку при повному замиканні зазору, переміщення поршня штучно обмежується 95% від початкової величини зазору. Таке обмеження практично не впливає на точність електромагнітних результатів, але гарантує коректну роботу числової сітки.

У представлений підхід навмисно не включено еластичні деформації матеріалів - модель вважається абсолютно жорсткою. Альтернативою, яка дозволяє моделювати повний «колапс» зазору та контакт між поверхнями, може бути застосування:

режиму Stop Condition (зупинка розв'язання за подією),
подальшого продовження розрахунку зі зміненою геометрією,
використання Events Interface для відстеження моменту зіткнення,
моделей гнучкого чи частково гнучкого контакту між поршнем і нерухомим осердям.

Застосування цих методів є доцільним у задачах, де необхідно дослідити ударну взаємодію, пружні зіткнення або залишкові деформації конструктивних елементів.

3. РЕЗУЛЬТАТИ МОДЕЛЮВАННЯ

У процесі перехідного аналізу чітко простежуються декілька характерних стадій. Протягом перших приблизно 45 мс струм у котушці зростає, формуючи початкове магнітне поле. Однак на цьому етапі електромагнітної сили ще недостатньо, щоб подолати опір пружини та зрушити плунжер з місця.

У проміжку між 45 мс і 85 мс магнітне поле посилюється до такого рівня, що магнітна сила стає вищою за реакцію пружини. Плунжер починає рухатися вниз у напрямку нерухомого сердечника, поступово скорочуючи повітряний зазор. Коли він досягає нової рівноважної позиції, його рух припиняється.

У цей момент у системі різко зростає індуктивність через майже повне замикання магнітного контуру. Це збільшення індуктивності призводить до тимчасового спаду струму, адже часова стала RL-ланки змінюється. Після остаточного замикання зазору плунжер і сердечник утворюють суцільний замкнений магнітопровід, що істотно зменшує магнітний опір системи. У результаті формується нова RL-ланка з іншою сталою часу, і струм знову починає зростати - уже відповідно до нового електромагнітного режиму.

На рисунках 3.1 і 3.2 наведені розподіли магнітних полів у площинах симетрії для двох станів:

- коли повітряний зазор ще відкритий,
- коли він повністю замкнувся.

В обох випадках добре помітний вплив вихрових струмів, що виникають у масивних частинах сердечника. Через шкірний ефект ці струми концентруються у відносно тонкому поверхневому шарі матеріалу та перешкоджають проникненню змінного магнітного поля в глибину осердя. Фактично вони виконують роль електромагнітного «екрану», який частково ізолює внутрішні області сердечника від поля. Це впливає на ефективну магнітну проникність i , відповідно, на величину притягувальної сили.

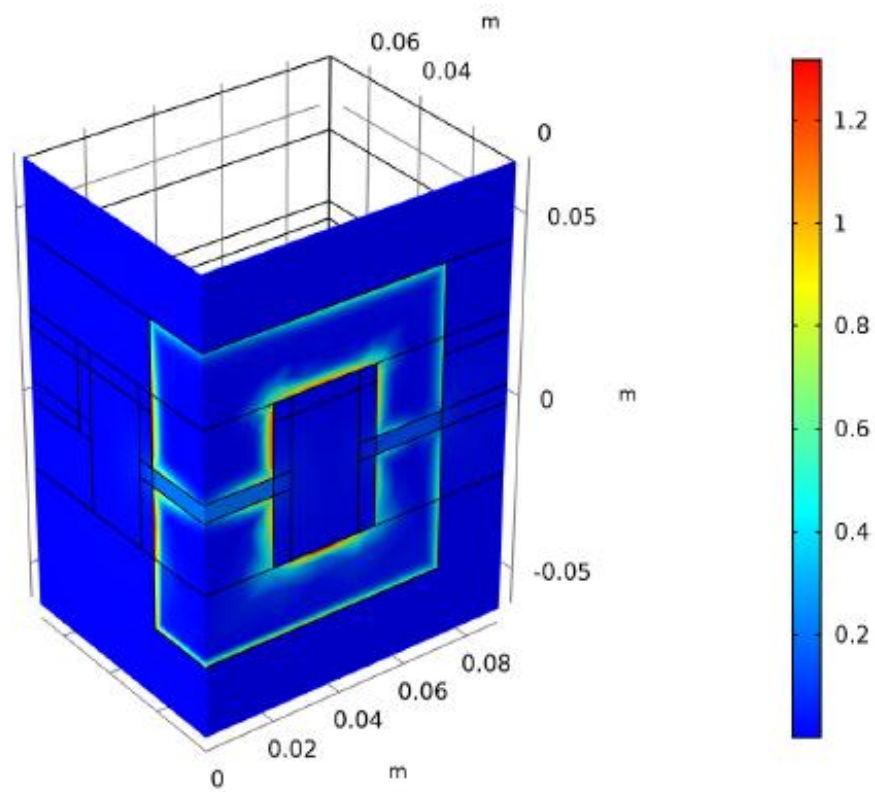


Рис. 3.1 Магнітний потік (нормальна компонента) при $t = 0,05$ с, коли зазор відкритий.

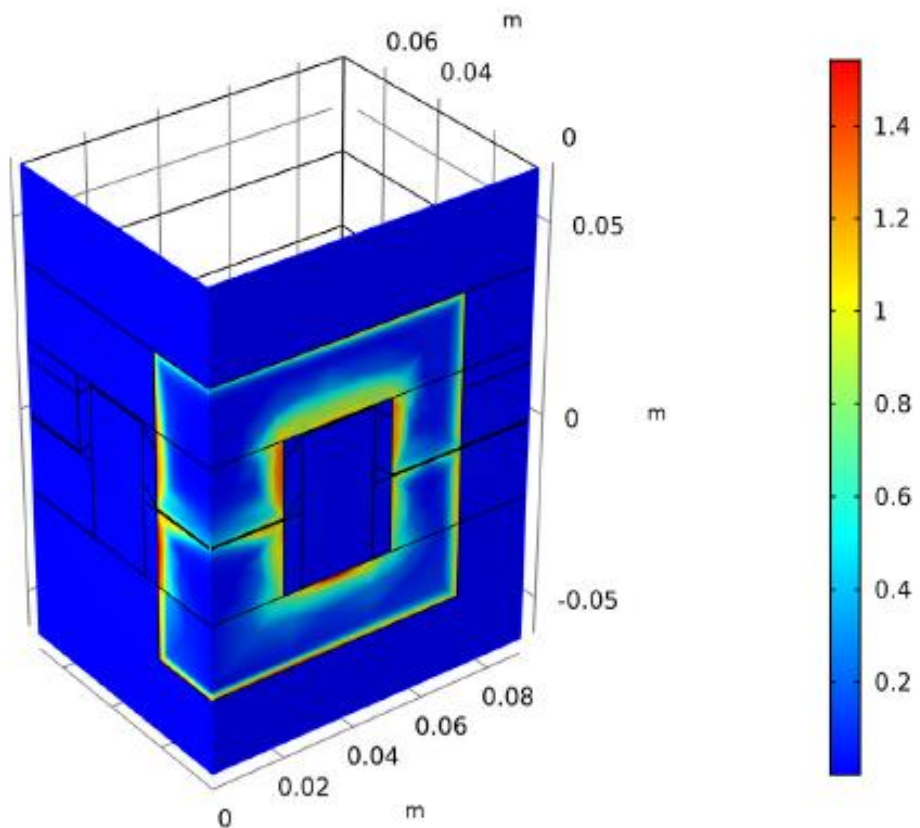


Рис. 3.2 Магнітний потік (нормальна компонента) при $t = 0,1$ с, коли зазор закрито.

На рисунку 3.3 показано, як змінюється магнітний потік у різні моменти часу під час моделювання. У верхньому лівому фрагменті зображено початковий стан, коли пружина все ще перебуває у переднатягнутому положенні, а рухомий плунжер не зрушився. Магнітне поле на цьому етапі ще недостатньо сильне, щоб викликати переміщення.

У міру збільшення магнітної сили (верхній правий фрагмент) плунжер починає долати опір пружини та поступово зміщується вниз. На рисунку видно, як магнітні лінії згущуються в області повітряного зазору, що свідчить про посилення притягувальної сили.

Коли магнітна сила досягає свого максимального значення (нижній лівий фрагмент), пружина практично повністю стискається, і повітряний зазор майже замкнений. У цей момент магнітний потік проходить більшою мірою через ферромагнітний матеріал сердечника, а індуктивність системи істотно зростає.

На фінальному етапі моделювання (нижній правий фрагмент) пружина повністю стиснена, плунжер знаходиться в крайньому нижньому положенні, і повітряний зазор зведений до мінімуму. Внутрішні вихрові струми, що виникають у масиві сердечника, істотно зменшуються, а їхній вплив на структуру магнітного поля стає мінімальним. На цьому етапі магнітна система переходить до стаціонарного режиму з максимальною ефективною магнітною провідністю.

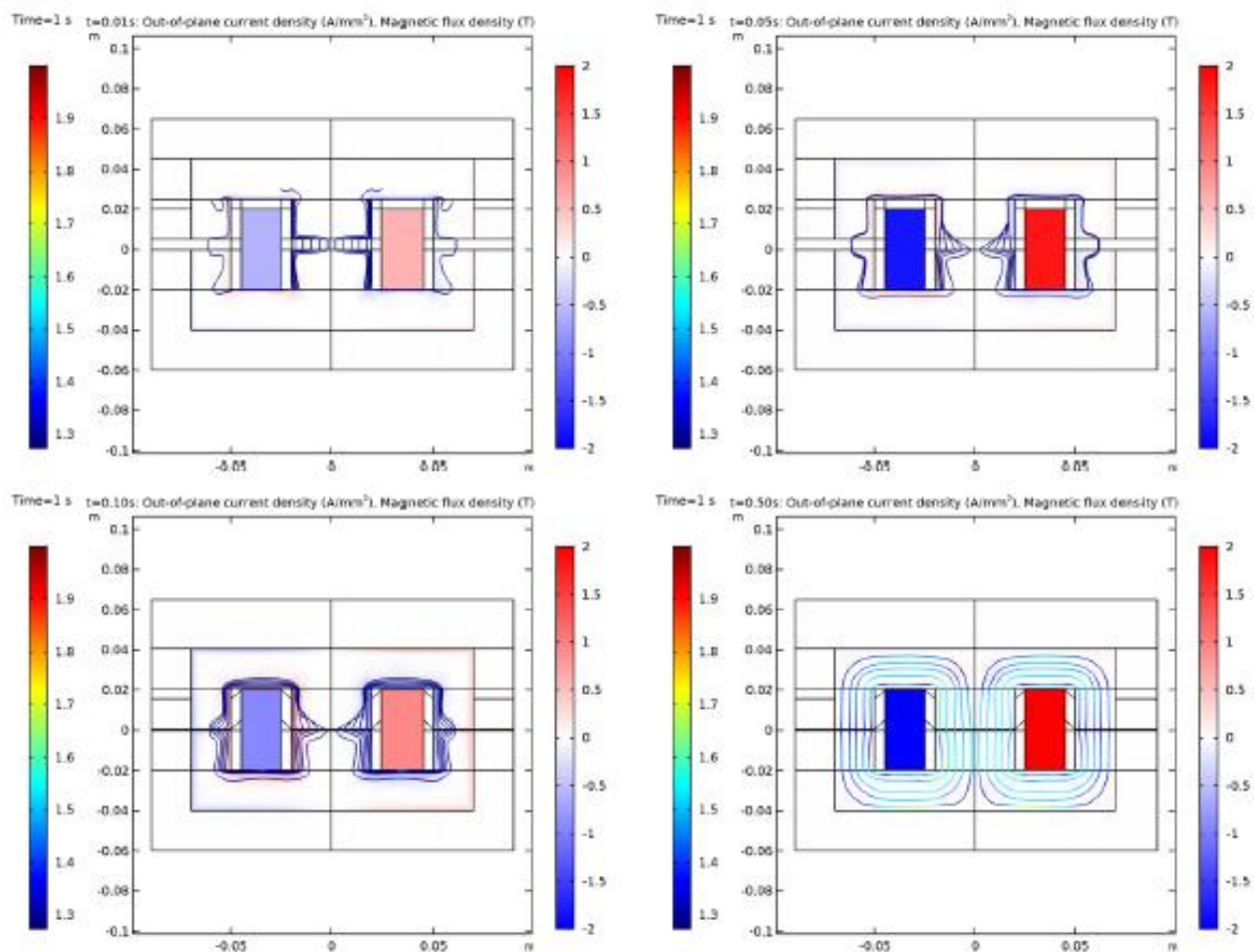


Рис. 3.3 Зміна щільності струму (поверхня) та щільності магнітного потоку (потоки) в різний час.

3.4 Показує основні втрати в пристрої, викликані індукованою щільністю струму. Ця інформація може бути корисною для прогнозування можливого перегріву пристрою.

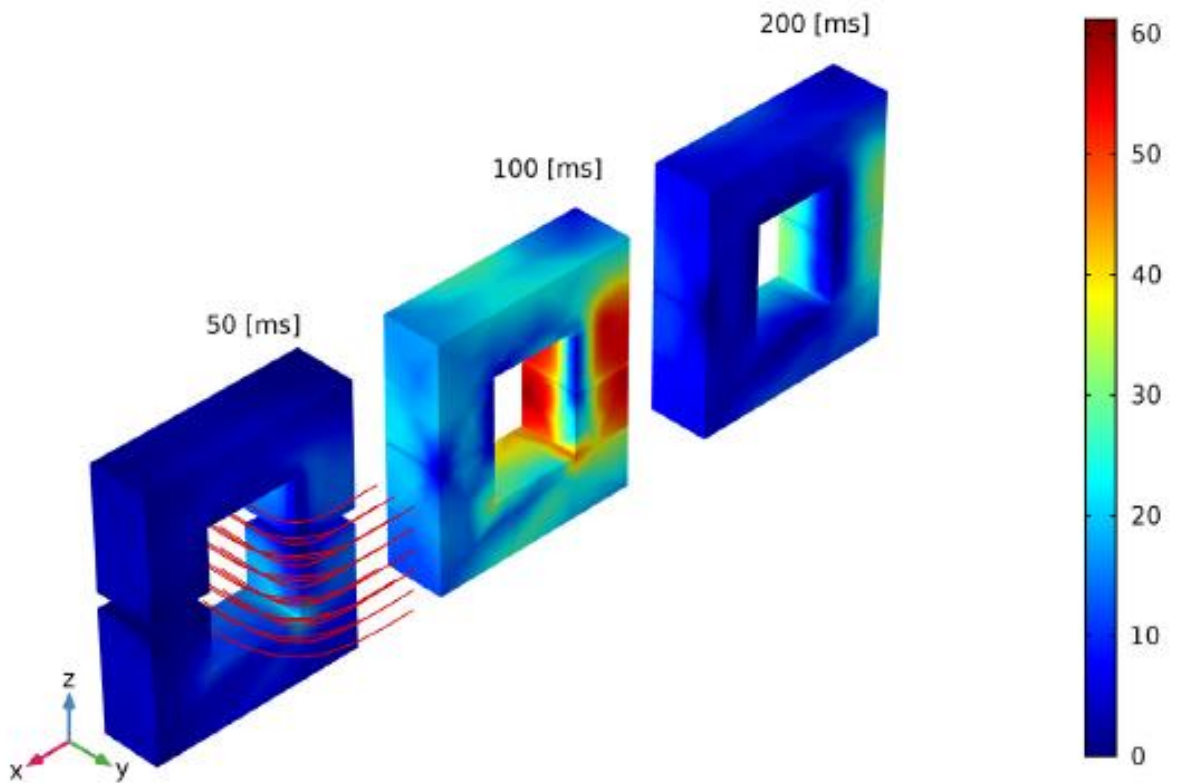


Рис. 3.4 Основні втрати (Вт/дм^3) через індуковані струми в різні моменти часу.

Тут наведено серію графіків, що ілюструють поведінку магнітного вимикача до переміщення плунжера, у процесі його руху та після завершення переміщення.

Етап 1. До початку руху плунжера

На рисунку 2.7 представлено початкову фазу моделювання, під час якої пружина ще не зазнала стиснення.

Синя лінія відображає нормалізований струм в обмотці.

Зелена лінія показує величину робочого повітряного зазору.

Червона крива відповідає експоненціальній апроксимації струму індуктивного кола RL для стаціонарного індуктора.

Ця фаза демонструє, як зростання струму у нерухомому магнітному колі відповідає теоретичному відгуку ідеалізованої RL-системи.

Етап 2. Рух плунжера та стиснення пружини

На рисунку 3.4 відображено процес руху плунжера в напрямку до магнітопроводу, що супроводжується поступовим стисненням пружини та подальшим зменшенням повітряного зазору.

Синя та зелена лінії так само відповідають нормалізованому струму та величині зазору.

Червона лінія відображає механічну силу, що виникає під час руху плунжера (вона відмінна від нуля лише протягом активної фази переміщення).

У цій частині моделювання спостерігається взаємодія електромагнітної сили та механічного опору пружини, що визначає момент початку та швидкість руху плунжера.

Етап 3. Після завершення руху плунжера

Рисунок 3.5 демонструє фінальну стадію моделювання, коли пружина вже повністю стиснута, а плунжер досяг крайнього положення.

Червона крива відтворює втрати в осерді, які суттєво зростають під час динамічного руху плунжера внаслідок зміни магнітного потоку та виникнення вихрових струмів.

Після завершення переміщення система повертається до режиму, близького до стаціонарного, і струм знову починає збільшуватися відповідно до нелінійного характеру RL-ланцюга.

Цей етап особливо важливий для оцінки теплових та енергетичних характеристик пристрою, оскільки збільшені втрати в магнітопроводі можуть впливати на довговічність і ефективність роботи вимикача..

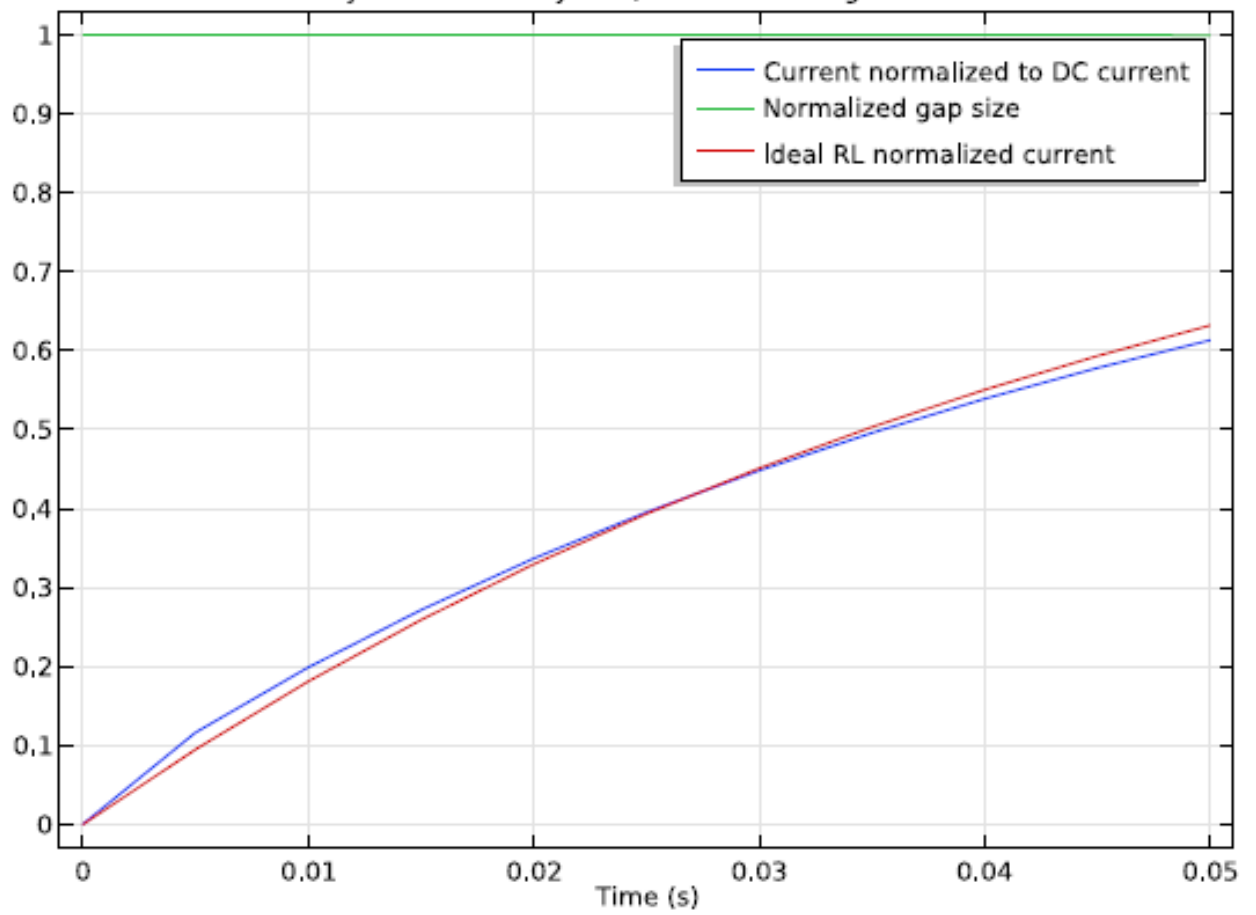


Рис. 3.5 Густина магнітного потоку (нормальна компонента) при $t = 0,05$ с, коли зазор відкритий.

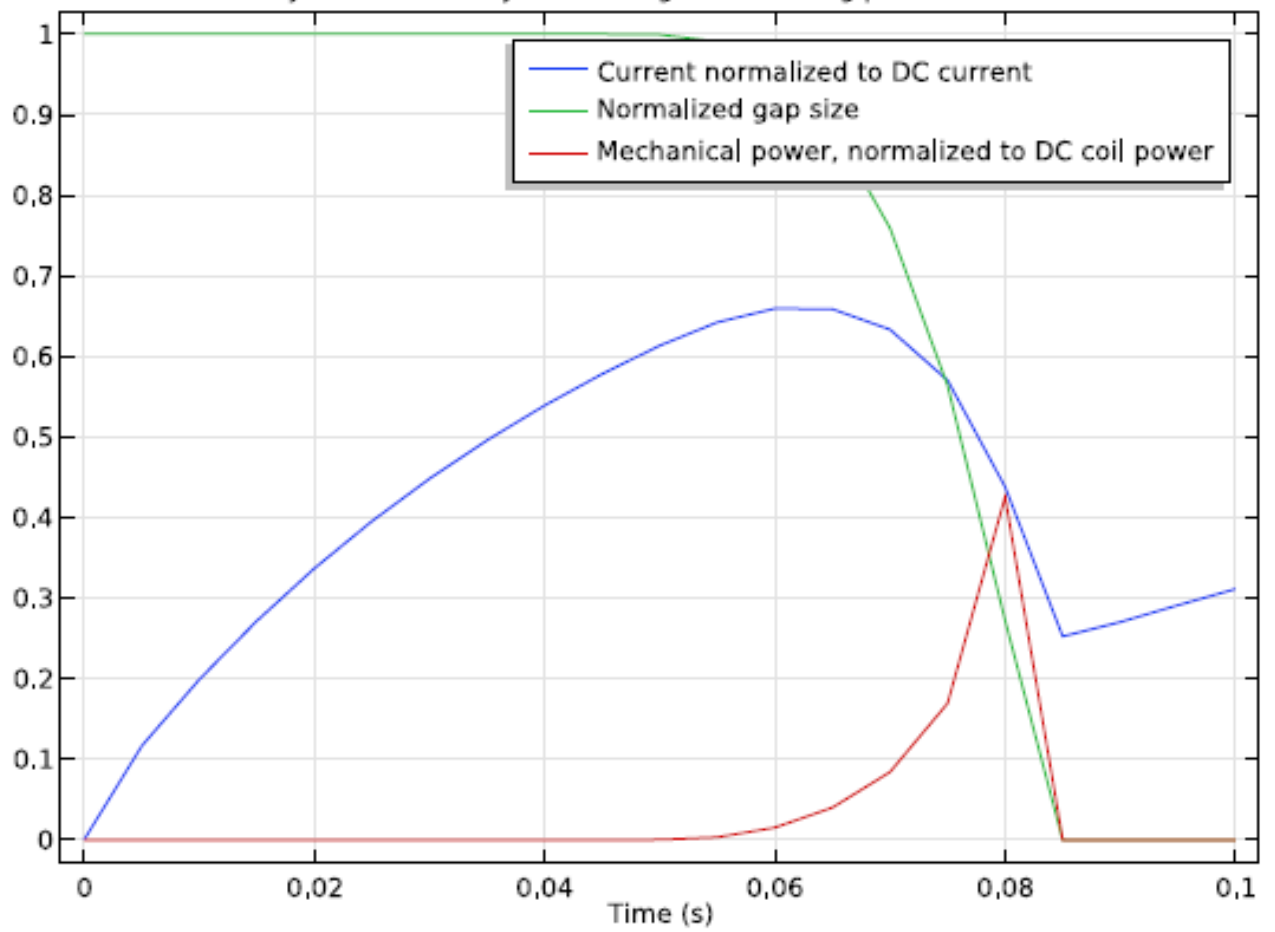


Рис. 3.6 Густина магнітного потоку (нормальна компонента) при $t = 0,1$ с, коли зазор закритий.

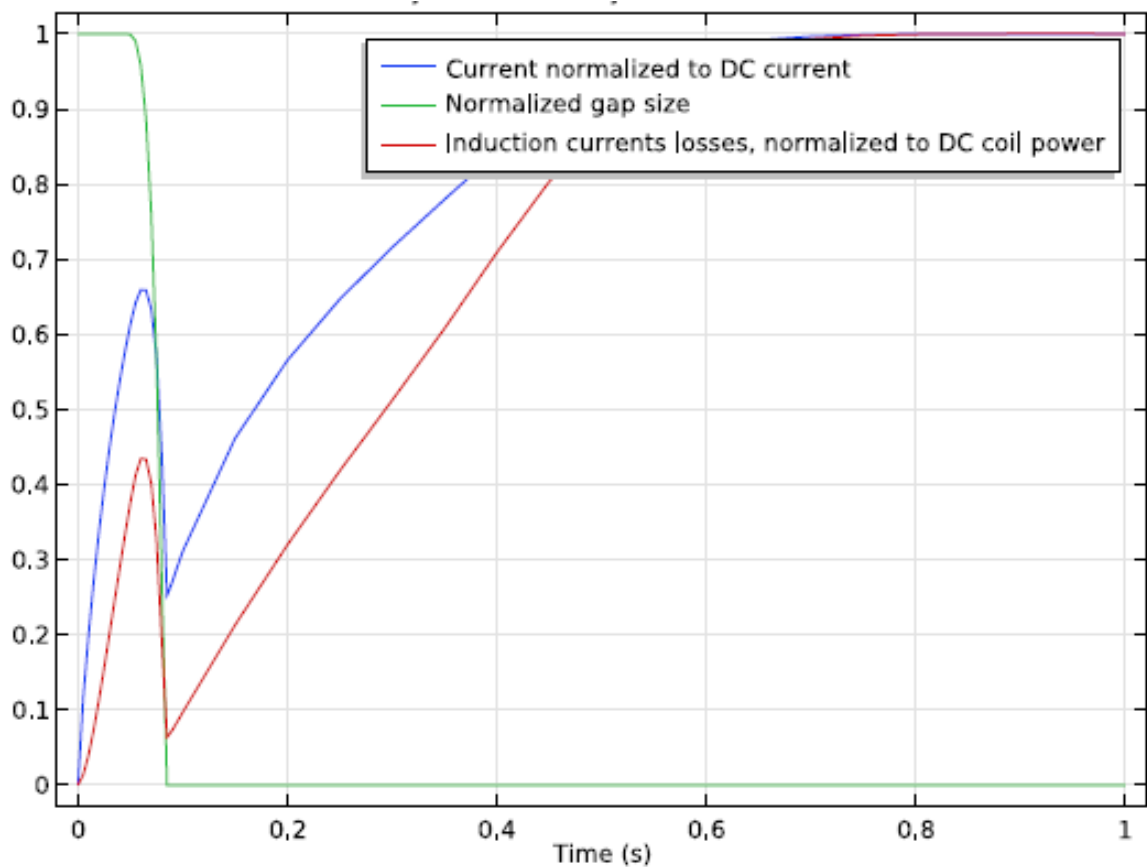


Рис.3.7 Втрати в осерді

Після повного закриття повітряного зазору вихрові струми зменшуються ще більше. Це відбувається тому, що замкнений магнітний контур майже не містить “розсіяних” повітряних проміжків, а магнітне поле проходить здебільшого через ферромагнітний матеріал із низьким опором. Через це зміна магнітного потоку всередині сердечника сповільнюється, а індуковані вихрові струми зменшуються, що знижує додаткові втрати та нагрів матеріалу.

4. ОБСЛУГОВУВАННЯ І РЕМОНТ ЕНЕРГЕТИЧНОГО ОБЛАДНАННЯ

4.1 Організація монтажу і експлуатація енергообладнання

Всі електромонтажні роботи повинні виконуватися лише за необхідності та відповідно до чинних норм і правил безпеки. Зокрема, вони повинні відповідати вимогам Правил монтажу електроустановок (ПМЕ), інструкціям відділів, нормам підприємства, а також технічним регламентам і монтажним інструкціям виробників обладнання.

Допускається продовження робіт з монтажу електроустановок на будівельних майданчиках лише за наявності повної технічної документації: схем, креслень та паспортів обладнання. Це дозволяє забезпечити безпечні та якісні умови роботи для персоналу та зберегти працездатність електрообладнання після монтажу.

Організація робіт з монтажу електрообладнання повинна враховувати застосування технологічних процесів та можливість механізованих операцій, що підвищують продуктивність, точність монтажу та зменшують ризик травмування персоналу.

Виконання монтажу здійснюється на основі:

Технічного проекту об'єкта – включає електричні схеми, специфікації обладнання та інструкції з монтажу.

Проекту виконання монтажних робіт (ПВМР) – розробляється залежно від складності об'єкта та організаційної структури монтажних робіт (БМУ, ПМК, трест, або на замовлення монтажних організацій і проектних інститутів).

ПВМР включає:

пояснювальну записку;

план будівництва та послідовність монтажу;

технологічні маршрути та карти встановлення обладнання;

лінійні графіки робіт;

перелік та характеристики монтажного обладнання;
графіки доставки матеріалів;
інформацію про потреби у матеріалах та інструментах.

Всі електрообладнання, кабелі та комплектуючі, що поставляються, повинні відповідати технічним вимогам та бути забезпечені необхідною документацією (паспортами, сертифікатами якості). Замовник повинен організувати підготовку електроприладів, генераторів, підстанцій та іншого обладнання до монтажу і пусконаладження.

Пускові та налагоджувальні роботи виконуються монтажним персоналом з використанням відповідного монтажного обладнання, керуючих пристроїв та інструментів. Під час цих робіт здійснюється перевірка працездатності електрообладнання та автоматизації, тестування електричних ланцюгів, налаштування захисних та контрольних пристроїв для забезпечення повної готовності системи до експлуатації.

Згідно з сучасними нормативами:

ДСТУ EN 50110-1:2020 – безпека електричних установок під час експлуатації та монтажу;

ДСТУ 7398-2014 – монтаж електроустановок низької напруги;

ДСТУ ІЕС 60364-4-41:2019 – вимоги щодо захисту від ураження електричним струмом;

ДСТУ ІЕС 60947-1:2021 – вимоги до апаратури низької напруги, що використовується при монтажі.

Ці стандарти визначають обов'язкові заходи безпеки, порядок перевірки обладнання, вимоги до документації та кваліфікації персоналу. Дотримання цих вимог забезпечує надійну та безпечну експлуатацію електроустановок після монтажу та пусконаладження.

4.2 Розрахунок об'єму робіт по обслуговування енергетичного обладнання.

В сучасних компаніях застосовується широкий спектр електрообладнання, що відрізняється конструктивними особливостями, типами установок, технічними характеристиками та експлуатаційними вимогами. Це ускладнює планування робіт, визначення необхідного часу та ресурсів для технічного обслуговування та контролю роботи електротехнічного персоналу.

Для спрощення обчислень окреме фізичне обладнання перетворюється у уніфіковані одиниці, що дозволяє стандартизувати розрахунки робіт. Для цього використовуються коефіцієнти перерахунку, які враховують конструктивні особливості, складність обслуговування та час, необхідний для виконання типових операцій (огляд, перевірка, чистка, заміна деталей, налаштування).

Етапи розрахунку обсягу робіт:

Ідентифікація обладнання

Визначаються типи енергетичних пристроїв (трансформатори, вимикачі, розподільчі щити, генератори тощо).

Вказуються номінальні параметри та специфікації обладнання.

Переведення у стандартні одиниці

Використання коефіцієнтів перерахунку для приведення різних типів обладнання до уніфікованих одиниць обслуговування.

Коефіцієнти враховують складність конструкції, масу, розміри та особливості експлуатації.

Складання таблиці обсягу робіт

Таблиця включає:

Тип обладнання;

Кількість одиниць;

Коефіцієнт перерахунку;

Обсяг робіт у стандартних одиницях;

Загальний час або трудовитрати для обслуговування.

Це дозволяє визначити потребу в персоналі, терміни виконання робіт та забезпечити планування ресурсів.

Корекція розрахунків

Обсяг робіт уточнюється з урахуванням специфічних умов експлуатації, частоти технічного обслуговування, вимог безпеки та можливості механізації робіт.

Такий підхід дозволяє стандартизувати облік робіт з обслуговування енергетичного обладнання, оптимізувати розподіл трудових ресурсів і забезпечити ефективний контроль над виконанням планових операцій.

4.3. Розрахунок річних працезатрат на виконання ТО енергетичного обладнання пункту технічного обслуговування і діагностування енергетичного обладнання

Щорічні витрати на оплату праці персоналу, залученого до технічного обслуговування електрообладнання, визначаються на основі нормативних значень робіт, що включають:

Періодичне обслуговування – планові перевірки та налаштування обладнання відповідно до графіка;

Всебічне обслуговування – детальний огляд і тестування всіх функцій обладнання;

Поточний ремонт – усунення виявлених дефектів і дрібних несправностей.

Кількість планових перевірок визначається виходячи з конкретної системи електропостачання (ПЗУ), експлуатаційних умов та періодичності перевірок, яка може змінюватися залежно від сезонності використання обладнання та електроприводів.

Для сезонного обслуговування (наприклад, на початку та в кінці експлуатаційного сезону) передбачається, що продуктивність робіт збільшується на 15% порівняно із звичайним обслуговуванням. Це пояснюється концентрованою організацією робіт, зменшенням простоїв обладнання та підвищенням ефективності завдяки попередній підготовці та плануванню.

Витрати на оплату праці обчислюються за формулою:

$$C_{\text{річні}} = \sum_{i=1}^n (R_i t_i K_s) \quad (4.1)$$

де:

R_i – тарифна ставка або погодинна оплата праці для персоналу, що обслуговує обладнання типу

t_i – трудовитрати на обслуговування одного елемента обладнання типу

K_s – коефіцієнт сезонного підвищення продуктивності (для сезонного обслуговування $K_s=1,15$);

n – кількість типів обладнання в системі.

Такий підхід дозволяє точно планувати річні витрати на обслуговування, оптимізувати розподіл ресурсів та підвищити надійність експлуатації електроустановок.

4.4 Планування профілактичних заходів

Ефективна та безпечна експлуатація електрообладнання забезпечується своєчасним і якісним технічним обслуговуванням, профілактичними заходами та поточним ремонтом. Усі роботи з обслуговування формують систему планових та профілактичних заходів, яка дозволяє підтримувати обладнання в робочому стані та запобігати аварійним ситуаціям.

Планування технічного контролю та ремонту базується на нормативних значеннях періодичності та трудомісткості цих заходів з урахуванням умов експлуатації обладнання. Одночасно проводиться розрахунок потреби у матеріалах та запасних частинах, необхідних для обслуговування. Основною метою планування є складання щоквартальних графіків технічного обслуговування та ремонту з урахуванням особливостей обладнання.

У процесі експлуатації виділяють два основних види профілактичних заходів:

Технічне обслуговування – систематичні заходи з підтримки обладнання у справному стані;

Ремонт – включає поточний та капітальний ремонт для усунення виявлених дефектів та відновлення працездатності обладнання.

Технічне обслуговування поділяється на:

Щоденне виробниче обслуговування – виконуються короткострокові перевірки, огляди та налаштування, які не вимагають зупинки обладнання;

Планове (періодичне) обслуговування – проводиться за встановленим графіком ремонтним персоналом енергетичної служби, включає детальну перевірку, налаштування та профілактичні роботи.

Тривалість періоду між плановими технічними обслуговуваннями та ремонтами визначається типом електрообладнання, умовами експлуатації, навколишнім середовищем та ступенем навантаження.

Основним документом для організації робіт є графік технічного обслуговування та ремонту, складений на поточний рік відповідно до вимог системи ПЗП та нормативних документів з експлуатації електроустановок.

Такий підхід забезпечує:

підвищення надійності роботи електрообладнання;

зниження ризику аварій та простоїв;

оптимальне планування ресурсів та персоналу;

своєчасне виявлення та усунення дефектів.

5. БЕЗПЕКА ПРАЦІ

5.1 Загальні положення

Охорона праці – це комплекс законодавчих, соціально-економічних, організаційних, технічних, гігієнічних, лікувально-профілактичних заходів, спрямованих на забезпечення безпеки, здоров'я та працездатності працівника протягом робочого часу.

Науково-технічний прогрес значно змінив умови праці: робота стала більш інтенсивною, вимогливою до фізичних, розумових та емоційних ресурсів людини. Це зумовило необхідність комплексного підходу до ергономіки, гігієни та організації праці, а також раціонального регулювання робочого часу та відпочинку.

Захист здоров'я працівників, попередження професійних захворювань та виробничого травматизму є одним із головних завдань сучасного суспільства. У цьому контексті важливо впроваджувати передові методи організації праці, зменшувати ручну та низькокваліфіковану працю, створювати робоче середовище, що мінімізує ризики професійних захворювань і травм.

Раціоналізація робочого місця

Створення сприятливих умов праці та естетичний дизайн робочих місць підвищує продуктивність і комфорт працівників. При цьому враховуються:

Колір та оформлення приміщень – кольори меблів і стін мають позитивно впливати на психологічний стан працівника. Для офісів із одноманітною розумовою роботою рекомендуються спокійні, холодні тони (зелений, синій), що сприяють концентрації та знижують нервову напругу.

Раціональне розташування робочих інструментів та документації – забезпечує мінімальні траєкторії руху та економію фізичних зусиль працівника.

Організація робочого місця – передбачає ергономічну висоту столу, правильне розташування монітора, клавіатури та обладнання, щоб зменшити фізичне навантаження та запобігти розвитку захворювань опорно-рухового апарату.

Організація освітлення

Раціональне освітлення – один із ключових факторів продуктивності та безпеки праці. Воно впливає на ефективність діяльності та попередження травматизму. Недостатнє або надмірне освітлення може викликати:

- перенапруження очей;
- передчасну втому;
- роздратування, сльозотечу;
- погіршення уваги та концентрації, що підвищує ризик нещасних випадків.

Основні причини напруження зору:

Недостатнє освітлення;

Надмірне освітлення;

Неправильний напрямок світла (різкі тіні, відблиски).

Розрахунок та організація штучного освітлення

Для створення оптимальних умов роботи необхідно правильно розрахувати штучне освітлення, визначивши тип ламп, їх кількість та розташування.

Основні джерела освітлення: лампи розжарювання та люмінесцентні лампи.

Переваги люмінесцентних ламп:

- спектральний склад близький до природного денного світла;
- високий коефіцієнт корисної дії (на 1,5–2 рази вище, ніж у ламп розжарювання);
- підвищена світловіддача (в 3–4 рази вище);
- тривалий термін служби.

Оптимальне освітлення забезпечує комфортне сприйняття, зменшує навантаження на очі та підвищує продуктивність праці. Особливо важливо для професій, що вимагають концентрації та точності, наприклад, програмування або технічна документація.

5.2 Ступені небезпеки роботи в електроустановках

До роботи в електроустановках допускаються лише особи старші 18 років, які пройшли навчання з правил безпеки при експлуатації електроустановок та склали кваліфікаційний іспит.

Працівники отримують сертифікат із зазначенням кваліфікаційної групи, що підтверджує рівень допуску.

Існує 5 кваліфікаційних груп, де:

Перша група не допускає самостійної роботи з електрообладнанням.

Друга та вищі групи дозволяють роботу з відповідними обмеженнями та під наглядом.

Персонал, що обслуговує електроустановки, зобов'язаний проходити медичний огляд не рідше одного разу на 2 роки.

Класифікація робіт за рівнем небезпеки

Роботи з електрообладнанням поділяються на 4 групи за ступенем небезпеки:

Робота без відключення напруги, на відстані від активних частин:

Працівник не може випадково торкнутися струмопровідних деталей.

Спеціальні технічні заходи, такі як відключення або ізоляція, не обов'язкові.

Робота без відключення напруги на близькій відстані від струмопровідних частин:

Необхідні організаційні та технічні заходи безпеки.

Використовуються ізоляційні засоби для роботи на живих елементах.

Робота з частковим відключенням напруги:

Напруга знімається лише з обладнання, на якому виконуються роботи.

Можливий доступ до сусідніх приміщень з живими частинами, що вимагає додаткових запобіжних заходів.

Робота з повним відключенням напруги:

Усі частини системи знеструмлені.

Доступ до суміжних приміщень із живими елементами обмежений.

Найбільший ризик становить ремонтний персонал, тому для нього передбачені особливі технічні та організаційні заходи безпеки.

Технічні заходи безпеки

Відключення напруги та фізичне ізолювання робочої зони.

Встановлення огорожень та застережливих плакатів («Не включати – працюють люди», «Висока напруга!»).

Перевірка відсутності напруги за допомогою індикаторів, навіть у дощову погоду.

Використання переносних заземлень, розміщених на безпечній відстані від живих частин.

Механічне блокування роз'єднувачів і вимикачів для запобігання несанкціонованому ввімкненню.

Виконання всіх перевірок з діелектричними рукавичками та належною обережністю.

Організаційні заходи безпеки

Оформлення нарядів та допусків до робіт в електроустановках.

Нагляд під час виконання робіт та фіксація завершення у відповідних журналах.

Заборона несанкціонованої роботи або розширення робочої зони.

Виконання робіт лише відповідно до письмового або усного замовлення, що діє не більше 1 дня.

5.3 Аналіз небезпечних та шкідливих виробничих чинників при роботі за комп'ютером

Реалізація дипломного проекту з моделювання теплових та електромагнітних процесів у сепараторних контактах вимагає тривалого використання комп'ютерних програм, таких як Excel та Mathcad. Робота за комп'ютером протягом тривалого часу пов'язана з певними небезпечними та шкідливими факторами, які впливають на здоров'я людини. Для забезпечення безпечних умов праці необхідно провести аналіз цих факторів та вжити заходів для їх мінімізації.

1. Фізичні шкідливі та небезпечні фактори

Температурні фактори:

Підвищення температури поверхні комп'ютерного обладнання (моніторів, системних блоків).

Неправильна температура повітря в робочій зоні (занадто висока або низька).

Вологість повітря:

Підвищена або знижена вологість може спричиняти дискомфорт, пересихання слизових оболонок, електростатичні заряди.

Електромагнітне випромінювання:

Підвищений рівень електромагнітного випромінювання від моніторів, принтерів та інших периферійних пристроїв.

Освітлення:

Відсутність природного освітлення або його недостатність.

Недостатнє штучне освітлення на робочому місці.

Надмірна яскравість монітора чи світильників, що призводить до перенапруження зорового апарату.

Вібрації та шум:

Вібрація від роботи комп'ютера, принтера або іншого обладнання.

Підвищений рівень шуму у приміщенні (кондиціонери, вентиляційні системи).

2. Психофізіологічні шкідливі фактори

Інформаційне навантаження:

Великий обсяг інформації, що обробляється за одиницю часу, підвищує когнітивне та психоемоційне навантаження.

Нераціональна організація робочого місця:

Незручне розташування клавіатури, монітора та інших пристроїв підвищує м'язову напругу та дискомфорт.

Зоровий стрес:

Тривале фокусування на екрані призводить до перевтоми очей, зниження гостроти зору, сухості очей.

Одноманітність робочого процесу:

Відсутність перерв і одноманітність завдань викликають втому, зниження концентрації та уваги.

Нервові та емоційні перевантаження:

Стрес через терміни виконання завдань або складність проекту може викликати підвищене серцебиття, напруження плечей та шиї, порушення сну.

3. Типові прояви впливу на організм

Головний біль і мігрень.

Поколювання та втому очей, зниження гостроти зору.

Болі у шиї, плечах, руках та спині через неправильну позу та тривале сидіння.

Загальна втома, роздратованість, зниження концентрації та продуктивності.

4. Рекомендації для зменшення впливу шкідливих факторів

Мікроклімат:

Підтримувати оптимальну температуру (20–24 °C) і вологість (40–60 %).

Регулярне провітрювання приміщення.

Ергономіка:

Встановлення монітора на рівні очей, правильне положення клавіатури та стільця.

Використання підставки для ніг та підтримки спини.

Освітлення:

Комбіноване освітлення – природне та штучне, без різких тіней та відблисків.

Регулювання яскравості та контрасту монітора.

Перерви:

Кожні 50–60 хвилин робити 5–10-хвилинну паузу для очей і зміни положення тіла.

Захист від електромагнітного випромінювання:

Використання сертифікованих екранів та обладнання з низьким рівнем випромінювання.

Психологічні заходи:

Планування робочого навантаження, розділення складних задач на етапи, виконання вправ для розслаблення очей і шиї.

5.4 Інженерно-технічні заходи з охорони праці

Для забезпечення безпеки вживайте наступних захисних заходів:

Вирощування мікроклімату в комп'ютерній кімнаті:

Оптимальні мікрокліматичні умови - це параметри мікроклімату, які підтримують нормальний тепловий стан організму, забезпечують тепловий комфорт, що створює умови для високої продуктивності.

Приміщення для роботи з персональними комп'ютерами повинні бути обладнані системою обігріву, кондиціонування або подачі та витяжної вентиляції. На робочих місцях слід забезпечити оптимальні значення параметрів мікроклімату: температуру, відносну вологість та рухливість повітря (таблиця 4.1).

Оптимальні значення параметрів мікроклімату.

Пора року	Температура повітря, град. С	Відносна вологість, %
Холодна	10	50686,8
Тепла	7	35480,76

- відстань від тильної поверхні одного персонального комп'ютера до екрана іншого – 2,5 м.

1. Розташування робочих станцій та обладнання

Якщо робота потребує особливої концентрації, робочі станції суміжних операторів повинні бути відокремлені перегородками висотою 1,5–2 м для мінімізації відволікаючих факторів.

Монітор слід розташовувати на оптимальній відстані від очей користувача - 600–700 мм, враховуючи розмір буквено-цифрових символів та графічних елементів.

Положення екрана має забезпечувати вертикальний кут огляду +30° від нормальної лінії зору, що зменшує напруження шийних м'язів та очей.

Клавіатура повинна розташовуватися на відстані 100–300 мм від краю столу, зверненого до працівника.

Конструкція клавіатури має передбачати регульований кут нахилу 5–15° та матову поверхню з коефіцієнтом відбиття 0,4.

Висота середнього ряду клавіш не повинна перевищувати 30 мм.

Пристрої введення/виводу (миші, планшети) повинні бути розташовані для зручності ручного управління з урахуванням моторного поля, висота – 900–1300 мм, ширина – 400–500 мм.

Вібраційні килимки слід встановлювати під голчастими принтерами для зменшення шуму та вібрацій.

2. Освітлення

Робоче приміщення повинно мати природне та штучне освітлення.

Штучне освітлення на робочих місцях забезпечується рівномірною системою освітлення.

При роботі з документами дозволяється комбіноване освітлення: загальна система + локальні світильники.

Локальні світильники встановлюють так, щоб не було відблисків на екрані.

Для штучного освітлення рекомендується використовувати люмінесцентні лампи; лампочки розжарювання допускаються лише у локальних світильниках.

Світильники розташовуються зліва від робочого місця, паралельно лінії зору працівника.

Світильники без відтінків і решіток кришки не допускаються, щоб уникнути розсіювання світла і засліплення.

3. Електробезпека

Персональні комп'ютери та периферійне обладнання повинні відповідати класу електробезпеки та мати захист від короткого замикання та інших аварійних режимів.

Використання легкозаймистих проводів обмежується; перевага надається негорючим ізоляційним матеріалам.

Нейтральний провідник використовується лише для заземлення електроспоживачів. Не допускається використання нейтрального провідника як захисного.

Заземлення проводиться від розподільної панелі до силових розеток окремо для нейтрального робочого та захисного провідника.

У приміщеннях з більше ніж п'ятьма комп'ютерами встановлюється аварійна зупинка, що повністю відключає живлення (крім освітлення).

4. Режим роботи та відпочинку

Для збереження здоров'я та працездатності слід передбачити короткі перерви при появі ознак втоми або зниження концентрації.

Основний робочий час за комп'ютером не повинен перевищувати 50% загального робочого часу без перерв.

Рекомендовано виконувати комплекс фізичних вправ під час перерв, що сприяє:

- Зменшенню нервової та емоційної напруги;
- Поліпшенню мозкового кровообігу;
- Зменшенню негативних наслідків гіподинамії;
- Попередженню зорової втоми.

5.5 Пожежна профілактика

Обладнання приміщень для забезпечення пожежної безпеки

Аудиторії та комп'ютерні зали повинні бути оснащені:

автоматичною пожежною сигналізацією;

системою пожежогасіння;

портативними вогнегасниками: не менше 2 шт на кожні 20 м² приміщення;

планом евакуації, який повинен бути розташований у доступному для всіх місці та легко читатись [11].

Горючі матеріали, відкритий вогонь, а також електрообладнання з несправною ізоляцією заборонені.

Рекомендації щодо експлуатації комп'ютерної техніки

Після завершення роботи всі комп'ютери та периферійні пристрої повинні бути відключені від електромережі.

Обладнання, кабельні канали та простір між поверхами слід пилососити не рідше одного разу на квартал для зменшення накопичення пилу та запобігання загорянню.

Електричні мережі та обладнання повинні експлуатуватися відповідно до чинних технічних регламентів та стандартів електробезпеки (наприклад, ДСТУ EN 50110, ДСТУ ІЕС 60364).

Вимоги до електрообладнання та його обслуговування

Всі роботи проводяться тільки з електрообладнанням у справному стані: ізоляція проводів, штепсельних розеток, вимикачів та іншого обладнання має бути цілісною.

Необхідно дотримуватись правил заземлення та огороження струмопровідних частин.

Забороняється:

Використовувати кабелі та дроти з пошкодженою ізоляцією або з втраченими захисними властивостями;

Залишати живі дроти та неізольовані кінці електропроводів;

Переміщати увімкнене електрообладнання;

Залишати без нагляду опалювальні прилади, телевізори, радіоприймачі та інше електрообладнання;

Підключати саморобні подовжувачі, які не відповідають вимогам PUE для портативного кабелю;

Підключати електричні дроти або лампи (крім відкритих ламп) у недозволених місцях.

Організаційні заходи безпеки

Виконання робіт у комп'ютерних залах та лабораторіях має проводитись під контролем відповідальної особи, яка слідкує за дотриманням правил пожежної безпеки та електробезпеки.

Регулярне проведення інструктажів та навчання персоналу щодо пожежонебезпечних ситуацій і дій при пожежі.

ВИСНОВКИ

Значення електричних та електронних пристроїв у системах електропостачання

Електричні та електронні пристрої контролюють потік енергії від джерела до споживача та є ключовими елементами у генерації, розподілі та автоматизації електропостачання. Їх ефективність безпосередньо впливає на надійність роботи енергетичних систем, включаючи електричний транспорт та промислові установки. Разом з електричними машинами ці пристрої формують основу електрифікації та автоматизації сучасного виробництва.

Характеристика комутаційних пристроїв

Основну частку витрат і конструктивної складності в електричних системах складають комутаційні пристрої: вимикачі, автоматичні вимикачі, вимикачі навантаження, роз'єднувачі, ізолятори та запобіжники. Вони відзначаються відносно рідкісним включенням та вимиканням, проте виконують критично важливу функцію - забезпечують безпечне комутування струмів і захист від аварійних режимів.

Моделювання режимів роботи автоматичних вимикачів

Дослідження динаміки автоматичних вимикачів, включаючи їх взаємодію з механічними елементами (пружинами, плунжерами) і електричними ланцюгами (RL-ланцюги), дозволяє:

оцінити зміну струмів у фазах включення та вимикання;

прогнозувати виникнення вихрових струмів та магнітних втрат у сердечнику;

оптимізувати конструкцію вимикачів для мінімізації втрат енергії та механічного зносу;

підвищити надійність систем електропостачання через точне визначення критичних моментів спрацювання.

Фізичні аспекти моделювання

При моделюванні враховані електромагнітні та механічні процеси:

стиск пружин і переміщення плунжера визначають час і силу спрацювання;

індуковані струми та магнітні поля всередині сердечника змінюються у відповідь на комутаційні дії;

після закриття зазору вихрові струми зменшуються через стабілізацію магнітного потоку та зниження індуктивних змін.

Практичне значення моделювання

Проведене моделювання дозволяє:

планувати технічне обслуговування і ремонт автоматичних вимикачів;

оцінювати терміни служби механічних і електричних компонентів;

підвищувати безпеку експлуатації електроустановок у відповідності до стандартів електробезпеки;

інтегрувати автоматичні вимикачі у сучасні системи керування енергоспоживанням і захисту.

Моделювання режимів роботи автоматичних вимикачів є необхідним етапом для забезпечення безпеки, надійності та ефективності електропостачання. Воно дозволяє врахувати як електричні, так і механічні фактори, оптимізувати конструкцію пристроїв та підвищити довговічність і стабільність роботи енергетичних систем.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Правила улаштування електроустановок. Четверте видання, перероблене й доповнене - Х.: Вид-во «Форт», 2017.- 736 с.
2. Perea Mena, B., Valencia Velasquez, J. A., López Lezama, J. M., Cano Quintero, J. B., & Muñoz Galeano, N. Circuit Breakers in Low- and Medium-Voltage DC Microgrids for Protection against Short-Circuit Electrical Faults: Evolution and Future Challenges. Applied Sciences, 2022. – URL: <https://www.mdpi.com/2076-3417/12/10/5000>
3. Emmers, G. The impact of protection devices on the availability of low voltage direct current bus. 2025. – URL: <https://www.sciencedirect.com>
4. ABB Group. Low Voltage Selectivity. 2022. – URL: <https://new.abb.com/low-voltage/products/circuit-breakers>
5. Гадай, А. В. Селективність автоматичних вимикачів Legrand // Наукові праці ДонНТУ, серія “Електротехніка і енергетика”, №2(29), 2023. – URL: <https://elen.domntu.edu.ua>
6. Ярас, В. І. Дослідження автоматичного вимикача (кваліфікаційна робота). KNUBA, 2024. – URL: <https://repository.knuba.edu.ua>
7. Analysis of Characteristics of Low Voltage Circuit Breaker by External Magnetic Field. 2025. ResearchGate. – URL: <https://www.researchgate.net/publication/361234567>
8. BEAMA Guide – Low Voltage Circuit-breaker Standards. 2022. – URL: <https://www.beama.org.uk/static/2ccf2300-dc04-42e1-86b5a1fb8986c75d/guide-to-low-voltage-circuit-breakers.pdf>
9. Umair Shahzad. A Risk Based Probabilistic Transient Stability Approach for Ranking of Circuit Breakers in a Power System. 2025. arXiv. – URL: <https://arxiv.org/abs/2501.01234>
10. МІНІСТЕРСТВО ЕКОНОМІКИ УКРАЇНИ. ДСТУ EN 60898-2:2022. Автоматичні вимикачі для постійного й змінного струму. – Київ, 2022. – URL: <https://me.gov.ua/file/e513dfe8-9c19-41b3-91b2-380b9a471533>

11. IEC 60898-2:2016. Circuit-breakers for overcurrent protection. Part 2: Circuit-breakers for a.c. and d.c. operation. – Geneva: International Electrotechnical Commission, 2016. – URL: <https://webstore.iec.ch/en/publication/25675>
12. EN 60898-2:2006. Low-voltage circuit breakers. – Brussels: CENELEC, 2006. – URL: <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/clc/f0e56e9f-d78d-4ab2-82f9-8b396e821a22/en-60898-2-2006>
13. Основні характеристики автоматичного вимикача: технічні характеристики. – Україна, 2020. – URL: <https://sun.dn.ua/category/2020/02/23/uk/vyklucatel-osnovni-harakteristiki-avtomatichnogo-vimikaca-tehnicni-harakteristiki-avtomatichnih-vimikaciv.aspx>
14. Terasaki. Автоматичні вимикачі: керівництво вибору. – Україна, 2021. – URL: https://terasaki.es/Products/Catalogues/PDF/OTHER/UKR-Selection_guide-Ukrainian_Edition_15-G00UA.pdf
15. ДСТУ EN IEC 60947-1:2022. Низьковольтна комутаційна апаратура. Загальні правила. – Київ, 2022. – URL: https://e-construction.gov.ua/files/new_doc/3728029580368283042/2025-09-23/199db84f-10e1-4d16-b567-04b4761deaaf.pdf
16. ДСТУ EN 60947-6-1:2018. Низьковольтна апаратура багатофункціональна. – Київ, 2018. – URL: https://e-construction.gov.ua/files/new_doc/3728029580368283042/2025-09-23/199db84f-10e1-4d16-b567-04b4761deaaf.pdf