

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна
Навчально-науковий інститут «Українська інженерно-педагогічна академія»
Кафедра електротехніки і електроенергетики

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

магістра

на тему

Перспективи розвитку низьковольтних комутаційних апаратів на основі
принципу гібридної комутації
(тема кваліфікаційної роботи)

Виконав: студент 2м курсу, групи ДЕА-Е23мг
спеціальності: 141 Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка

_____/ Ігор СЕРІКОВ
(підпис) (ім'я та прізвище)

Керівник _____/ Ірина ПАНТЄЛЄЄВА
(підпис) (ім'я та прізвище)

Рецензент _____/ Юрій СИЧОВ
(підпис) (ім'я та прізвище)

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри _____/ Артем ЧЕРНЮК
(підпис) (ім'я та прізвище)

Нормоконтроль _____/ Юлія ОЛІЙНИК
(підпис) (ім'я та прізвище)

Секретар ЕК _____/ Ігор КИРИСОВ
(підпис) (ім'я та прізвище)

Харків – 2024 рік

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ В. Н. КАРАЗІНА

Навчально – науковий інститут Українська інженерно-педагогічна академія
Кафедра електротехніки та електроенергетики
Спеціальність 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
Освітньо-професійна програма Електричні станції, мережі та системи

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри

(підпис)

к.т.н., доцент Артем ЧЕРНЮК
(науковий ступінь, вчене звання, ім'я, прізвище)

«__» _____ 2024 р.

ЗАВДАННЯ

на кваліфікаційну роботу дипломну роботу
другого (магістерського) рівня вищої освіти

здобувачу вищої освіти **Ігорю СЕРІКОВУ**

1. Тема «Перспективи розвитку низьковольтних комутаційних апаратів на основі принципу гібридної комутації»

затверджена наказом по університету №4801-5/3345 від «12»__10__ 2024 р.

2. Термін здачі закінченої роботи «__10__»__12__ 2024 р.

3. Вихідні дані до роботи/проєкту: параметри нормального режиму електрообладнання; режими роботи мережі; параметри режимів роботи електричної мережі; типи комутаційних апаратів у заданій мережі

4. Зміст роботи/проєкту (перелік питань, які належить розробити):
ВСТУП; РОЗДІЛ 1.НИЗЬКОВОЛЬТНІ ЕЛЕКТРИЧНІ АПАРАТИ; РОЗДІЛ 2. ПРОБЛЕМИ МОДЕЛЮВАННЯ ГІБРИДНИХ СИСТЕМ КОМУТАЦІЙНИХ АПАРАТІВ; РОЗДІЛ 3. ШЛЯХИ РОЗВИТКУ НИЗЬКОВОЛЬТНИХ ГІБРИДНИХ КОМУТАЦІЙНИХ АПАРАТІВ; ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ

5.Перелік графічного матеріалу (презентаційний матеріал):

Слайди презентації

6. Консультант:

Розділ	Консультант	Підпис, дата		Оцінка (бали)
		Завдання видав	Завдання прийняв	

7. Дата видачі завдання « 12 » _____ 10 _____ 2024 р.

Керівник

(підпис)

Ірина ПАНТЕЛЄЄВА

(ім'я, прізвище)

Завдання прийняв до виконання

_____ Ігор СЕРІКОВ

(підпис)

(ім'я, прізвище)

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН-ГРАФІК виконання кваліфікаційної дипломної роботи

№ з/ п	Назва етапів роботи та питань, які мають бути розроблені відповідно до завдання	Термін виконання	Позначки керівника про виконання завдань
1	Визначення актуальності теми дослідження	02.10.24 – 05.10.24	
2	Проведення аналізу наукової літератури	06.10.24 – 15.10.24	
3	Виконання першого розділу дипломної роботи	16.10.24 – 29.10.24	
4	Виконання другого та третього розділу дипломної роботи	30.10.24 – 26.11.24	
5	Оформлення пояснювальної записки	27.11.24 – 07.12.24	

Студент (ка)

(підпис)

Ігор СЕРІКОВ

(ім'я, прізвище)

Нормоконтроль

(підпис)

Юлія ОЛІЙНИК

(ім'я, прізвище)

РЕФЕРАТ

до магістерської роботи з теми «Перспективи розвитку низьковольтних комутаційних апаратів на основі принципу гібридної комутації» магістрантом

Ігорем СЕРІКОВИМ

Магістерська робота виконана на ____ сторінок, містить ____ таблиць, ____ рисунків, що характеризують результати дослідження, використано літературних джерел ____.

Актуальність теми дослідження зумовлена сучасними тенденціями в енергетиці, промисловості та побуті, які вимагають підвищення надійності, ефективності та екологічності електротехнічного обладнання. Зростаюча інтеграція відновлюваних джерел енергії, збільшення кількості електронних пристроїв та потреба в забезпеченні стабільності роботи електричних мереж створюють нові виклики для технологій комутації.

Традиційні механічні комутаційні апарати демонструють обмеження у швидкості роботи, довговічності та стійкості до виникнення дугових розрядів. Це особливо критично у сучасних умовах, коли виникає потреба в обробці високих струмів та напруги із мінімальними втратами та швидкою реакцією на зміни в мережі. Водночас електронні пристрої комутації, хоча й пропонують швидкодію та високу точність, стикаються з проблемами нагрівання, підвищеної вартості та складністю реалізації у низьковольтних системах.

Гібридна комутація, яка поєднує механічні та електронні елементи, стає перспективним напрямком розвитку, оскільки вона дозволяє об'єднати переваги обох підходів. Зокрема, це забезпечує високу швидкість роботи, тривалий термін служби, мінімізацію енергетичних втрат та надійність функціонування в умовах складних режимів роботи. Використання такого принципу відкриває можливості для створення комутаційних апаратів нового покоління, що відповідають потребам сучасних електротехнічних систем.

Мета магістерської роботи - розробка науково-технічних основ і визначення перспектив розвитку низьковольтних комутаційних апаратів на основі принципу гібридної комутації, спрямованих на підвищення їхньої надійності, швидкодії, енергоефективності та адаптації до вимог сучасних електричних мереж із інтеграцією відновлюваних джерел енергії та технологій «розумних» мереж.

Ключові слова: низьковольтні комутаційні апарати, гібридна комутація, автоматичний вимикач, надійність електропостачання, моделювання комутації

ABSTRACT

to the master's thesis on the topic "Prospects for the development of low-voltage switching devices based on the principle of hybrid switching" by master's student Igor SERIKOV

The master's work is executed on ____ pages, contains ____ tables, ____ drawings, which characterize the results of research, used literary sources_____.

The relevance of the research topic is due to modern trends in energy, industry and everyday life, which require increased reliability, efficiency and environmental friendliness of electrical equipment. The growing integration of renewable energy sources, the increase in the number of electronic devices and the need to ensure the stability of electrical networks create new challenges for switching technologies.

Traditional mechanical switching devices exhibit limitations in speed, durability, and arcing resistance. This is especially critical in today's environment, where there is a need to handle high currents and voltages with minimal losses and rapid response to network changes. At the same time, electronic switching devices, while offering high speed and accuracy, face problems of heat generation, increased cost, and difficulty in implementing in low-voltage systems.

Hybrid switching, which combines mechanical and electronic elements, is becoming a promising direction of development, since it allows combining the advantages of both approaches. In particular, it provides high speed of operation, long service life, minimization of energy losses and reliability of operation in conditions of complex operating modes. The use of such a principle opens up opportunities for the creation of switching devices of a new generation that meet the needs of modern electrical systems.

The purpose of the master's thesis is to develop scientific and technical foundations and determine the prospects for the development of low-voltage switching devices based on the principle of hybrid switching, aimed at increasing their reliability, speed, energy efficiency and adaptation to the requirements of modern electrical networks with the integration of renewable energy sources and "smart" network technologies.

Keywords: low-voltage switchgear, hybrid switching, circuit breaker, power supply reliability, switching simulation

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

ВСТУП

РОЗДІЛ 1. НИЗЬКОВОЛЬТНІ ЕЛЕКТРИЧНІ АПАРАТИ

1.1. Класифікація низьковольтних комутаційних апаратів по технічним та конструктивним особливостям

1.2. Дослідження параметрів надійності низьковольтних комутаційних апаратів по експлуатаційним даним промислових підприємств

1.3. Вибір критерію оцінки технічного стану низьковольтних комутаційних апаратів

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 1

РОЗДІЛ 2. МОДЕЛЮВАННЯ ГІБРИДНИХ СИСТЕМ КОМУТАЦІЙНИХ АПАРАТІВ

2.1. Системний аналіз проблеми моделювання гібридних систем комутації

2.2. Аналіз фізичних процесів зносу електричних контактів комутаційних низьковольтних апаратів

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 2

РОЗДІЛ 3. ШЛЯХИ РОЗВИТКУ НИЗЬКОВОЛЬТНИХ ГІБРИДНИХ КОМУТАЦІЙНИХ АПАРАТІВ

3.1. Основні тенденції інноваційного розвитку комутаційних апаратів нового покоління

3.2. Створення нового покоління гібридних апаратів з бездуговою комутацією для спеціальної техніки

3.3. Перспективи розвитку низьковольтних комутаційних гібридних апаратів

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 3

ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ

СПИСОК ПОСИЛАНЬ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

ЕА – електричні апарати

САМПР – система автоматичного моделювання та проєктування

НКА – низьковольтні комутаційні апарати

СТК - силовий транзисторний ключ

ГА – гібридний апарат

ЕМП - електромеханічний привод

СПП – силові напівпровідникові прилади

ГК – головні контакти

ДП – дистанційний перемикач

МЕМС – мікро електромеханічні системи

КА - комутаційний апарат

НА – напівпровідниковий апарат

ВСТУП

Актуальність теми дослідження зумовлена сучасними тенденціями в енергетиці, промисловості та побуті, які вимагають підвищення надійності, ефективності та екологічності електротехнічного обладнання. Зростаюча інтеграція відновлюваних джерел енергії, збільшення кількості електронних пристроїв та потреба в забезпеченні стабільності роботи електричних мереж створюють нові виклики для технологій комутації.

Традиційні механічні комутаційні апарати демонструють обмеження у швидкості роботи, довговічності та стійкості до виникнення дугових розрядів. Це особливо критично у сучасних умовах, коли виникає потреба в обробці високих струмів та напруги із мінімальними втратами та швидкою реакцією на зміни в мережі. Водночас електронні пристрої комутації, хоча й пропонують швидкодію та високу точність, стикаються з проблемами нагрівання, підвищеної вартості та складністю реалізації у низьковольтних системах.

Гібридна комутація, яка поєднує механічні та електронні елементи, стає перспективним напрямком розвитку, оскільки вона дозволяє об'єднати переваги обох підходів. Зокрема, це забезпечує високу швидкість роботи, тривалий термін служби, мінімізацію енергетичних втрат та надійність функціонування в умовах складних режимів роботи. Використання такого принципу відкриває можливості для створення комутаційних апаратів нового покоління, що відповідають потребам сучасних електротехнічних систем.

Додатковим чинником актуальності є глобальна тенденція до автоматизації та цифровізації електричних мереж, де гібридні комутаційні апарати можуть відігравати ключову роль. Вони забезпечують не лише функції традиційної комутації, але й можливості інтеграції з системами моніторингу, діагностики та управління, що є критично важливим для побудови «розумних» електромереж.

Таким чином, дослідження перспектив розвитку гібридної комутації для низьковольтних апаратів є не лише технічно доцільним, але й стратегічно важливим для забезпечення інноваційного розвитку електроенергетичних систем та підвищення їхньої ефективності в умовах сучасних викликів.

Мета роботи – розробка науково-технічних основ і визначення перспектив розвитку низьковольтних комутаційних апаратів на основі принципу гібридної комутації, спрямованих на підвищення їхньої надійності, швидкодії, енергоефективності та адаптації до вимог сучасних електричних мереж із інтеграцією відновлюваних джерел енергії та технологій «розумних» мереж.

Для досягнення визначеної мети треба вирішити наступні **завдання**:

Для досягнення мети дослідження необхідно вирішити такі основні задачі:

- аналіз сучасного стану і тенденцій розвитку низьковольтних комутаційних апаратів з акцентом на переваги та обмеження існуючих технологій, включаючи механічну, електронну та гібридну комутацію;
- розробка теоретичної моделі гібридного комутаційного апарата, яка поєднує механічні та електронні компоненти для забезпечення оптимальних характеристик роботи;
- дослідження процесів комутації в гібридних системах з урахуванням динаміки струмів і напруги, теплових процесів та електродугових явищ;
- оптимізація конструктивних параметрів гібридного комутаційного апарата для досягнення високої надійності, швидкодії та мінімізації енергетичних втрат;
- розробка методів оцінки і моделювання роботи гібридних комутаційних апаратів у реальних умовах експлуатації, включаючи інтеграцію з «розумними» мережами та відновлюваними джерелами енергії.

- розробка рекомендацій щодо впровадження гібридних комутаційних апаратів у промислових і побутових електричних мережах, з урахуванням економічних і технічних аспектів.

Об'єкт дослідження – процеси гібридної комутації в низьковольтних комутаційних апаратах, що поєднують механічні та електронні компоненти для забезпечення ефективної комутації струмів у низьковольтних електричних мережах.

Предмет дослідження – принципи, методи та особливості реалізації процесів гібридної комутації в низьковольтних комутаційних апаратах для підвищення їхньої надійності, швидкодії та енергоефективності.

Наукова новизна одержаних результатів дослідження полягає у розробці нових підходів до реалізації процесів гібридної комутації в низьковольтних комутаційних апаратах, що дозволяють поєднувати механічні та електронні компоненти з оптимізацією їхньої взаємодії для досягнення високої швидкодії, надійності та мінімізації енергетичних втрат. У дослідженні створено теоретичну модель гібридного комутаційного апарата, яка враховує динамічні процеси, включаючи електродугові явища та теплові ефекти, а також запропоновано нові конструктивні рішення, що підвищують довговічність і стійкість апаратів у складних умовах експлуатації. Дослідження також впроваджує нові підходи до моделювання та аналізу роботи гібридних комутаційних апаратів із використанням сучасних комп'ютерних технологій, що дозволяє точно прогнозувати їхні характеристики в реальних умовах експлуатації.

Теоретичне значення одержаних полягає у створенні та обґрунтуванні нової моделі процесів гібридної комутації в низьковольтних комутаційних апаратах, яка враховує взаємодію механічних і електронних компонентів для забезпечення високої ефективності роботи. Розроблено аналітичні залежності, що описують динаміку електродугових явищ, теплові процеси та перехідні режими, які виникають під час комутації. Визначено оптимальні конструктивні параметри гібридних апаратів, що

дозволяють мінімізувати енергетичні втрати, покращити швидкодію та забезпечити стійкість роботи в умовах змінних навантажень. Також сформульовано критерії оцінки надійності та довговічності апаратів, розроблено методологію їх моделювання та прогнозування характеристик у різних режимах експлуатації.

Практичне значення одержаних результатів полягає в розробці нових технологічних рішень для створення ефективних низьковольтних комутаційних апаратів на основі гібридної комутації, які можуть бути широко застосовані в енергетичних системах, промисловості та побуті. Результати дослідження дозволяють створювати комутаційні апарати з підвищеною надійністю, швидкодією та енергоефективністю.

Методи дослідження: аналіз літературних джерел (для вивчення сучасного стану технологій комутації, визначення проблем і тенденцій розвитку низьковольтних комутаційних апаратів, а також для вивчення принципів гібридної комутації та її застосування); теоретичне моделювання (для створення математичних моделей процесів гібридної комутації, що включають механічні та електронні елементи. Це дозволяє оцінити динаміку комутаційних процесів, електродугові явища та теплові ефекти); чисельне моделювання (з використанням спеціалізованих програмних засобів для симуляції роботи гібридних комутаційних апаратів в різних режимах експлуатації); методи оптимізації (для визначення найбільш ефективних параметрів гібридних апаратів, що забезпечують мінімальні енергетичні втрати, високу надійність та швидкодію); методи системного аналізу (для інтеграції гібридних комутаційних апаратів у сучасні електричні мережі).

РОЗДІЛ 1. НИЗЬКОВОЛЬТНІ ЕЛЕКТРИЧНІ АПАРАТИ

Основним поштовхом до розвитку низьковольтних електричних апаратів (ЕА) є автоматизація виробництва та зростання потужності промислових установок, що вимагають підвищеної якості захисту електричних кіл; підвищені функціональні вимоги до апаратів щодо вмикаючої та відмикаючої здібностей, допустимої частоти включень, швидкодії, комутаційної та механічної стійкості тощо; ускладнення сучасної технології виробництва ЕА та впровадження нових матеріалів, що мають велику механічну міцність, тугоплавкість, дугостійкість, гарною електропровідністю та корозійною стійкістю; застосування стандартизації та значне розширення вузлової та по детальної уніфікації ЕА; підвищення вимог до надійності ЕА із зменшенням їх ваги та габаритів.

Загальні тенденції підвищення вимог до ефективності та надійності роботи ЕА викликали розвиток апаратів управління на герметизованих магнітокерованих контактах (герконах), які умовно можна назвати наполовину статичними, оскільки крім цих контактів у них немає жодних рухливих частин [1].

Апарати на герконах займають проміжне положення по довговічності між звичайними контактними та напівпровідниковими апаратами управління, що функціонально вельми підходять для поєднання напівпровідникових та контактних систем управління. Поряд із великими чисто технічними перевагами систем управління на напівпровідникових елементах, вони ще набагато дорожчі контактних систем управління, та в об'єктах із середнім та низьким рівнями автоматизації, з щодо невисокими вимогами за швидкодією та надійністю, економічно себе не виправдовують.

Сучасні ЕА для автоматизації виробничих процесів характеризуються стиранням відмінностей між традиційними електротехнічними елементами систем управління та елементами, які є традиційними для

приладобудування. Спостерігається підвищення питомої ваги випуску елементів, що займають проміжне положення між приладами та апаратами: апаратів команд безперервної та дискретної дії, електромеханічних реле рахунку імпульсів, датчиків механічних величин тощо.

Як у складних, так і в найпростіших системах управління, чітко простежуються тенденції до зменшення розмірів апаратури та її уніфікації, а також до створення та застосування комбінованих апаратів, що поєднують, наприклад, функції управління та захисту, управління та сигналізації тощо.

У міру розвитку електротехніки та електроніки в автоматичі стали застосовуватися різноманітні електронні прилади та електромагнітні пристрої. Зародилася нова галузь автоматики - електроавтоматика. Протягом кількох останніх десятиліть електроавтоматика отримала винятково широке поширення. Пояснюється це тим, що технічні засоби електроавтоматики є пристроями підвищеної чутливості та точності, мають невеликі розміри, малу вагу і, нарешті, можуть здійснити управління і контроль роботи однієї або декількох машин на відстані.

Технічні засоби автоматики виконують функції контролю та управління, які можуть реалізовуватися окремо або бути пов'язаними. У разі це часто робиться для виконання функції регулювання.

1.1. Класифікація низьковольтних комутаційних апаратів по технічним та конструктивним особливостям

Відомо, що розподілення електроенергії в цехових мережах між приймачами та управління роботою джерел енергії, ліній електропередачі та приймачів здійснюється за допомогою електричних апаратів. Хоча електричні апарати не виконують безпосередньо робочих функцій агрегату, проте є надзвичайно важливими і невід'ємними частинами даного

пристрою, від яких великою мірою залежить правильна, точна та надійна робота виконавчої частини пристрою. Тому відокремлювати електричний апарат від всього пристрою, представляти його як самостійну одиницю можна лише умовно.

Різноманітність апаратів та виконуваних ними функцій, поєднання в одному апараті кількох функцій не дозволяє строго класифікувати їх за однією якоюсь ознакою. Класифікація може бути проведена за цілою низкою ознак: призначення (основній функції, що виконується апаратом); сфери застосування; принципу дії, що використовується в апараті; роду струму; виконанню захисту від впливу навколишнього середовища; конструктивним особливостям та ін.

Виходячи з призначень електричного апарату, до нього пред'являються такі основні вимоги:

1) надійність, точність, стабільність і чіткість у роботі – апарат протягом певного терміну служби не повинен давати відмов, не повинен змінювати своїх параметрів та регулювання, повинний з достатньою швидкістю реагувати на зовнішні сигнали;

2) достатня термічна та електродинамічна стійкість – апарат повинен без пошкоджень переносити короточасні струмові навантаження аварійних режимів;

3) достатній рівень ізоляції частин, що знаходяться під напругою – апарат повинен без пошкоджень переносити перенапруги, що виникають при роботі, незважаючи на можливе забруднення ізоляції та її старіння;

4) найменші габарити та маса, найменші витрати енергії для своєї роботи та вартість.

За своїм призначенням електричні апарати можна поділити на [2]: комутаційні, струмообмежувальні, регулюючі та пускові регулюючі, вимірювальні, контролюючі та захисту:

комутаційні – призначені для включення та відключення електричних кіл. До них відносять рубильники, пакетні вимикачі, автоматичні

вимикачі. Для цієї групи апаратів характерним є відносно рідкісне їх включення та відключення, хоча в деяких випадках апарат досить часто здійснює такі операції.

За розташуванням у електричній схемі конкретної установки електричні апарати можна поділити на апарати: головного (силового) ланцюга, ланцюга управління, допоміжного ланцюга, сигнального ланцюга.

Деталі та вузли електричного апарату, у свою чергу, відповідно до їх призначення можна поділити на:

- активні, що несуть, крім механічного, ще електричні чи магнітні навантаження;
- конструктивні, що несуть лише механічне навантаження (до них відносяться і кріпильні деталі).

Активні частини можуть поділятися на струмопровідні (шини, дроти, обмотки), у тому числі контактні та струмопровідні кріпильні; магнітні; ізоляційні; дугогасні пристрої; електричні опори.

Конструктивні частини можуть підрозділятися на корпусні (основи, рами, каркаси, оболонки та ін.; деталі механізмів; пружини та кріплення.

Наведена класифікація елементів електричного апарату є у якомусь ступеню умовною, оскільки нерідко одна й та сама деталь виконує кілька функцій і може відноситися одночасно як до кількох підгруп, так і до обох груп.

За принципом дії розрізняють електричні апарати контактні та безконтактні. Контактні апарати мають рухливі комутуючі контакти та впливають на керований ланцюг замиканням або розмиканням цих контактів. Безконтактні апарати не мають комутуючих контактів та впливають на керований ланцюг зміною електричних параметрів (індуктивності, ємності, опору).

Контактні апарати можуть бути автоматичні та неавтоматичні. Автоматичні апарати діють від заданого режиму роботи ланцюга чи

машини, а неавтоматичні – за допомогою оператора, дистанційно чи безпосередньо.

Від якісної та надійної роботи автоматичних вимикачів, магнітних пускачів, контакторів, запобіжників, рубильників та пакетних вимикачів залежать безпека виробництва, ефективність функціонування систем внутрішньоцехового електропостачання, безперебійність технологічних процесів, якість виробництва, та працездатність установок та механізмів. Застосування виробничих систем без комутаційної апаратури у цьому разі виявляється недоцільним, вони стають ненадійними. Дослідження конструктивних та експлуатаційних особливостей низьковольтних апаратів сприяє вдосконаленню технологічних принципів проєктування, виробництва та експлуатації обладнання цехових мереж.

В даний час низьковольтне апаратобудування швидко розвивається, про що свідчить безліч фірм та заводів-виробників на ринку низьковольтних апаратів.

В силу великої різноманітності використання низьковольтних комутаційних апаратів виникає завдання їх систематизації та класифікації за конструктивними особливостями.

За результатами експериментальних досліджень [3] пропонуються наступні електричні схеми та схеми заміщення силових ланцюгів низьковольтних апаратів (рис.1.1-1.7).

Електрична схема заміщення силової частини контактора може бути представлена у вигляді, показаному на рис.1.1 та рис.1.2.

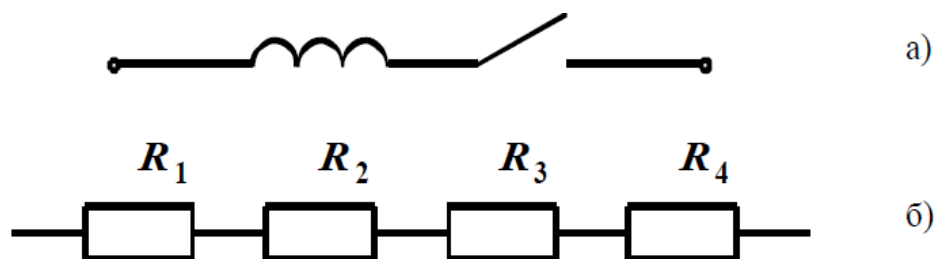


Рисунок 1.1 - Електрична схема (а) та схема заміщення (б) силового ланцюга контактора з одним контактом і гасінням дуги:

$R_1=R_4$ – опір болтових приєднань контактора; R_2 – опір дугогасної опір силових контактів у замкнутому стані

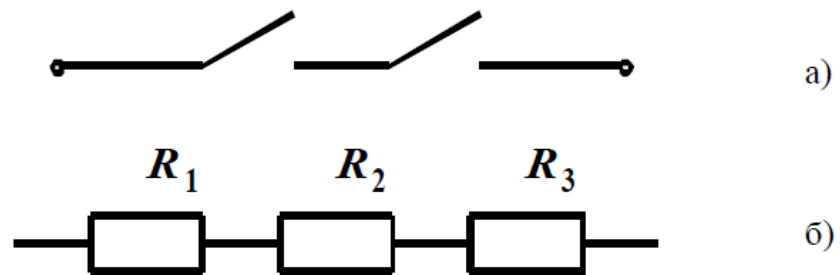


Рисунок 1.2 - Електрична схема (а) та схема заміщення (б) силового ланцюга контактора з містковими контактами: $R_1=R_3$ – опір болтових приєднань; R_2 – опір місткового контакту в замкнутому стані

Електрична схема та схема заміщення силового ланцюга магнітного пускача показана на рис.1.3.

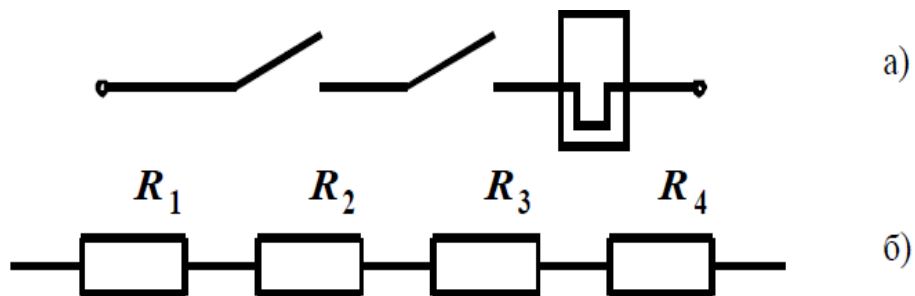


Рисунок 1.3 - Рис.3. Електрична схема (а) та схема заміщення (б) силового ланцюга магнітного пускача: $R_1=R_4$ – опір місткового контакту у замкнутому стані; R_3 – опір елемента теплового реле

У загальному вигляді електрична схема та схема заміщення силового ланцюга автоматичного вимикача показано на рис.1.4, а на рис.1.5 приведена електрична схема та схема заміщення силового ланцюга плавкого запобіжника.

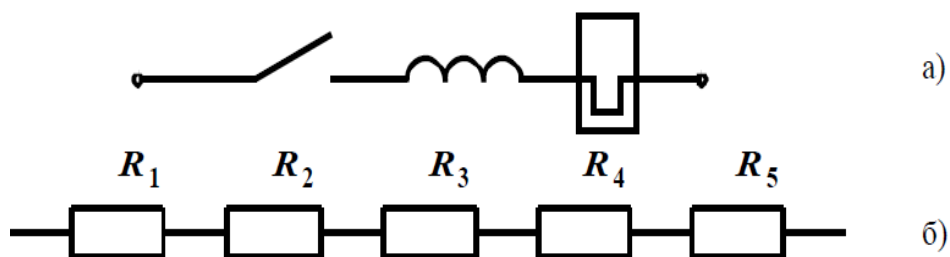


Рисунок 1.4 - Електрична схема (а) та схема заміщення (б) силового ланцюга автоматичного вимикача: $R_1=R_5$ – опір болтових приєднань; R_2 – опір силового контакту в замкнутому стані; R_3 - опір котушки, що відключає; R_4 – опір елемента теплового реле

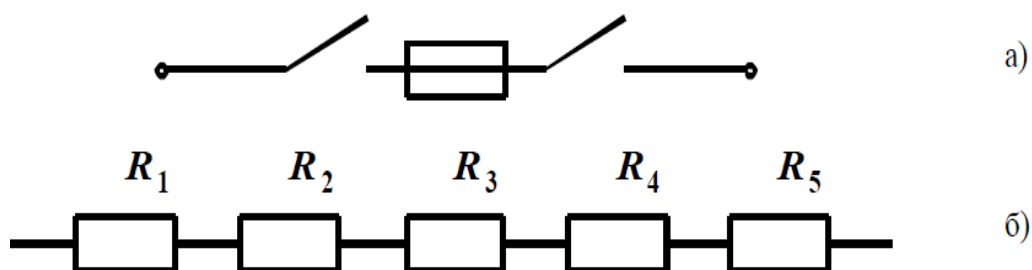


Рисунок 1.5 - Електрична схема (а) та схема заміщення (б) силового ланцюга плавкого запобіжника: $R_1=R_5$ – опір болтових приєднань; $R_2=R_4$ - опір між губками і ножами запобіжника; R_3 – опір плавкої вставки з її під'єднанням до ножів

На рис.1.6 показані електрична схема та схема заміщення силового ланцюга рубильника.

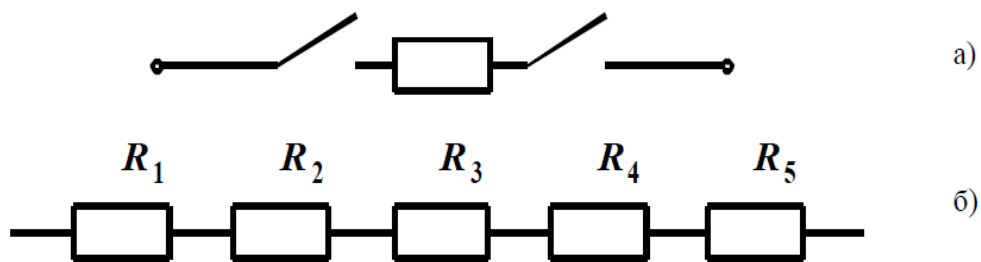


Рисунок 1.7 - Електрична схема (а) та схема заміщення (б) силового ланцюга рубильника: $R_1 = R_5$ - опір болтових приєднань;

$R_2 = R_4$ - опір переходів між губками та ножом рубильника; R_3 – опір ножа рубильника

На рис.1.7 показані електрична схема та схема заміщення силового ланцюга пакетного вимикача.

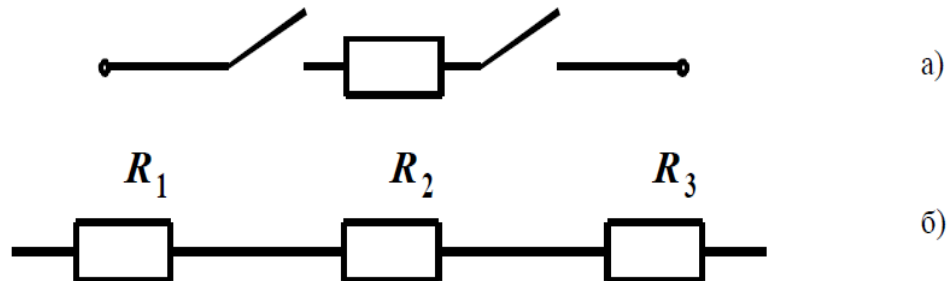


Рисунок 1.7 - Електрична схема (а) та схема заміщення (б) силового ланцюга пакетного вимикача: $R_1 = R_3$ - опір болтових приєднань; R_2 – опір двох контактів та середнього ножа; R_3 – опір ножа рубильника

Таким чином, результати досліджень [4] низьковольтних комутаційних апаратів, що застосовуються в цехових мережах промислового електропостачання показали, що за конструктивними особливостями апарати можна розділити на наступні 3 групи:

- апарати, що мають крім силових контактів у силовому ланцюзі додаткові елементи (датчики теплових реле, максимальні котушки реле), такі як автоматичні вимикачі, магнітні пускачі, контактори;
- апарати, що мають відносно великий опір силового ланцюга; - запобіжники;
- апарати, що мають тільки перехідний опір контактів, такі як рубильники, пакетні вимикачі.

Отримані дані можуть бути корисними фахівцям з проєктування, виробництва та експлуатації низьковольтної апаратури, для оцінки надійності та технічних параметрів тих чи інших апаратів для вдосконалення надійних та експлуатаційних характеристик апаратів, для

проведення експериментальних досліджень, а також для вибору, оцінки ефективності роботи конкретних апаратів.

1.2. Дослідження параметрів надійності низьковольтних комутаційних апаратів по експлуатаційним даним промислових підприємств

В електричних системах внутрішньозаводського електропостачання для низьковольтного обладнання характерні два загальновідомі види відмов: як раптових, так і зносових. Для оцінки працездатності електричних апаратів застосовуються перевірки на механічну та електричну стійкість вибіркового числа зразків [5]. При випробуванні апаратів виникають ситуації, коли певна частина зразків, що випробовуються, не відмовила за період спостереження. У таких випадках необхідно проводити статистичний аналіз вибірок, для яких характерна відсутність відомостей про моменти відмови у частині (або одного з) контрольованих об'єктів. Таке явище має назву цензурованих вибірок, а дані, які отримуються в результаті випробувань вибірки, називаються цензурованими. Зазначимо, що для таких вибірок необхідно застосовувати специфічні методи оцінки показників надійності та перевірки статистичних гіпотез, які, як правило, складніші за традиційні методи математичної статистики. Особливого значення аналіз цензурованих вибірок набуває в оцінці надійності складних і дорогих технічних пристроїв, а також виробів із дорогими методами випробувань: саме до останніх належать комутаційні апарати через тривалість енергетичної витратності випробувань на знос [6]. При цьому є можливість безпосередньої оцінки параметрів та виявлення виду закону надійності за випадковою вибіркою.

Для аналізу показників надійності у режимах експлуатації використані статистичні дані умовного Харківського промислового

підприємства. Спостереження щорічно проводились за автоматами серії ВА-57.

Імовірність часу безвідмовності визначається за виразом:

$$\hat{P}(t) = \frac{N_0 - n(t)}{N_0}$$

де N_0 – кількість контрольованих зразків; $n(t)$ - кількість відмов елементів за аналізований часовий інтервал.

У табл.1.1 представлені результати розрахунків показників надійності автоматичних вимикачів за інформацією експлуатаційних служб.

Таблиця 1.1 - Результати обчислень параметрів надійності автоматів ВА-57

Номер і-го інтервалу	Кількість циклів, z	Δt , години	$n(\Delta t_i)$, шт	P (t)	$\lambda(t)$, год ⁻¹
1	1500	0-17520	2	1	$0,040 \cdot 10^{-5}$
2	1250	17520-35040	2	0,98	$0,041 \cdot 10^{-5}$
3	1000	35040-52560	3	0,96	$0,062 \cdot 10^{-5}$
4	1000	52560-70080	4	0,95	$0,083 \cdot 10^{-5}$
5	1250	70080-87600	11	0,93	$0,236 \cdot 10^{-5}$
6	1100	87600-105120	25	0,9	$0,574 \cdot 10^{-5}$
7	1050	105120-122640	33	0,81	$0,858 \cdot 10^{-5}$
8	1000	122640-140160	39	0,7	$1,213 \cdot 10^{-5}$
9	1000	140160-157680	44	0,6	$1,769 \cdot 10^{-5}$
10	1000	157680-175200	54	0,47	$3,314 \cdot 10^{-5}$

На рис.1.8 показаний графік залежності ймовірності безвідмовності автоматів від часу експлуатації та комутаційного ресурсу.

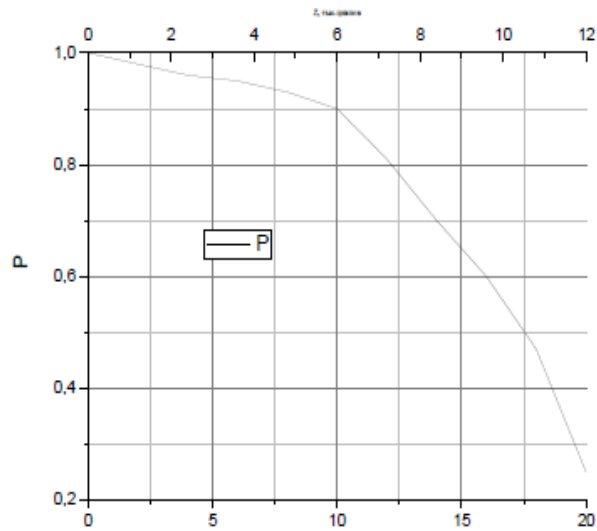


Рисунок 1.8 - Залежність ймовірності безвідмовності роботи автоматичних вимикачів від комутаційного ресурсу та часу експлуатації

Статистична оцінка інтенсивності відмов має вигляд:

$$\lambda(t) = \frac{n(\Delta t_i)}{N_{\text{ср}} \cdot \Delta t_i},$$

де $n(\Delta t_i)$ – кількість виходу з ладу елементів на тимчасовому інтервалі, що розглядається; $N_{\text{ср}}$ – кількість справних елементів. За отриманими даними представлений графік зміни інтенсивності відмов $\lambda(t)$ від відпрацьованого ресурсу автоматичних вимикачів ВА-57 (рис.1.9).

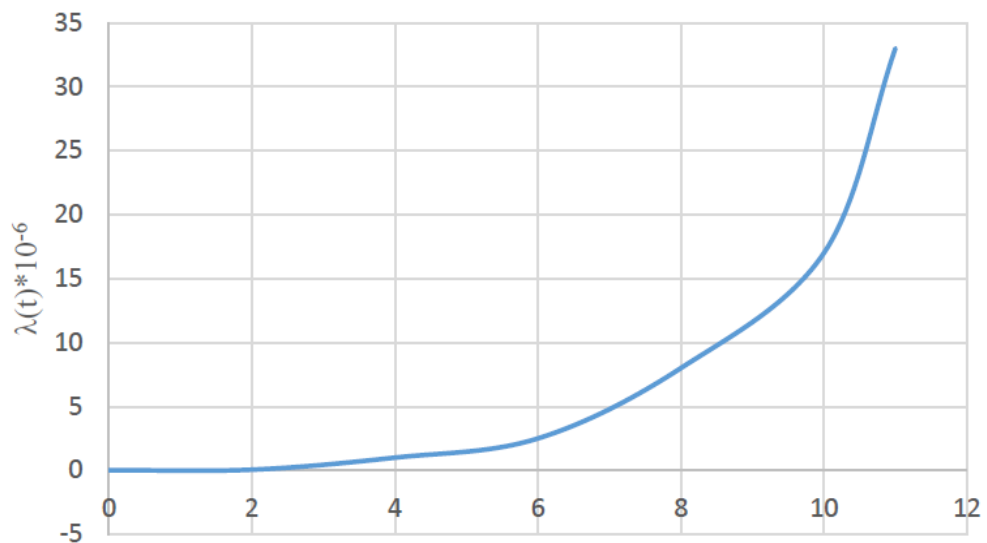


Рисунок 1.9 - Графік зміни $\lambda(t)$ від відпрацьованого ресурсу автоматів ВА-57

На рис.1.10 показані графіки залежності ймовірності безвідмовності автоматів ВА-57 від строку роботи, побудовані за результатами розрахунків та експлуатаційної інформації. З графіків видно, що протягом паспортного терміну служби автоматів (10-12 років), ймовірність безвідмовної роботи не знижується менш ніж до значення, що відповідає ДСТУ на низьковольтні комутаційні апарати [7].

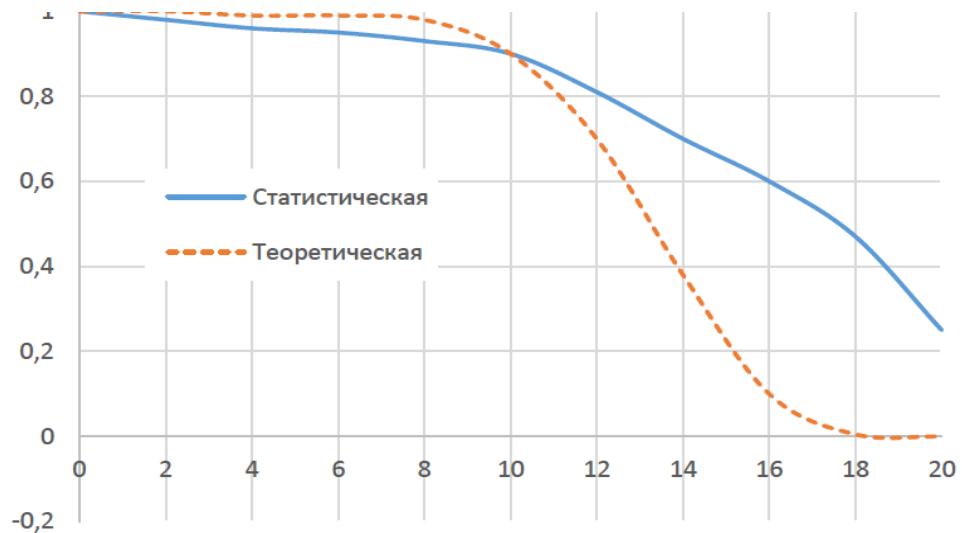


Рисунок 1.10 - Залежність ймовірності безвідмовної роботи від часу експлуатації для автоматичних вимикачів ВА-57

Для оцінки розбіжності між видом теоретичної залежності та графіком, побудованим за результатами експлуатаційних даних (рис.1.10), використовуються критеріальні положення Пірсона [8]. Покажемо застосування нормального розподілу для отриманих значень експлуатаційної інформації про відмови за елементами, що спостерігались. Тоді щільність ймовірності відмови та ймовірності безвідмовної роботи визначаються так:

$$f(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(t-T)^2}{2\sigma^2}}$$

$$Q(t) = \int_{-\infty}^t f(t)dt = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^t e^{-\frac{(t-m_t)^2}{2\sigma^2}} dt ,$$

$$P(t) = 1 - Q(t) ,$$

де: m_t – математичне очікування ресурсу до t_1 ; σ – напрацювання на відмову ресурсу від середньої величини значення; T - аналізований часовий інтервал випробувань.

Тут Φ – функція Лапласа. Імовірність функції часу безвідмовності нормального закону розподілу визначається:

$$P(t) = \frac{\Phi(\frac{m_t - t}{\sigma})}{\Phi(\frac{m_t}{\sigma})} .$$

За інформацією енергетичних служб низки підприємств Харкова: СКО напрацювання на відмову $\sigma = 2,5$ років = 21900 год., величина середнього часу працездатності становить усереднену величину математичного очікування $T_{ср} = m_t = 13$ років = 113880 год.

Підставимо дані значення у вираз (1.6) для побудови теоретичної залежності (рис.1.10). За критеріями Колмогорова враховується і оцінюється найбільша абсолютна величина різниці між теоретичною та дослідною кривою.

Умова відповідності $\Delta x > A(n,q)$ визначається формулою:

$$\Delta x = \Delta F \sqrt{N} ,$$

$$\Delta F = \max |F^*(t) - F(t)|$$

Максимальна розбіжність між дослідною та теоретичною функціями ;
 N – кількість елементів, що відмовили.

Підставимо обчислені дані, знайдемо:

$$\Delta x = 0,464 \cdot \sqrt{10} = 1,469 > 0,489.$$

Отримані результати показали обґрунтованість застосування нормального розподілу для показників надійності автоматів ВА-57.

Застосування критеріальних ознак χ^2 Пірсона дозволяє визначити міру розбіжності [9]:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^k \frac{(\Delta n_i - Np_i)^2}{Np_i},$$

де k – кількість інтервалів експериментального ряду; p_i – ймовірність знаходження випадкового параметра (ймовірності часу безвідмовності) у i -му інтервалі, отримана для теоретичної кривої розподілу; N – кількість спостережень.

Розподіл χ^2 визначається числом ступенів свободи: $s = k - z - 1$, де: z – кількість визначених параметрів розподілу.

Далі обчислюємо проміжні дані для розрахунку χ^2 (табл.1.2). Тоді значення p_i відповідають збільшенню функції розподілу $F(t)$ на i -му інтервалі.

Таблиця 1.2 - Дані визначення проміжних значень

$F(t)$	p_i	Np_i	$(\Delta n_i - Np_i)^2$	$(\Delta n_i - Np_i)^2 / Np_i$
1,000	$4,498 \cdot 10^{-6}$	0,001	3,996	4094,136
1,000	$1,549 \cdot 10^{-4}$	0,034	3,867	115,257
0,998	0,002	0,397	6,776	17,070
0,979	0,019	4,055	0,003	0,001
0,885	0,094	20,484	89,939	4,391
0,698	0,186	40,462	239,082	5,909
0,359	0,399	73,573	1646,143	22,374
0,115	0,244	53,025	196,695	3,709
0,023	0,092	20,033	574,401	28,672
0,003	0,020	4,310	2469,132	572,933

Обчислюємо:

$$\chi^2 = 4094,136 + 115,257 + 17,070 + 0,001 + 4391 + 5,909 + 22,374 + \\ + 3,709 + 28,672 + 572,933 = 4864,452.$$

За певним рівнем значущості $\varepsilon = 0,1$ [9] знаходиться $\chi^2 (N - 1, \varepsilon) = \chi^2 (9; 0,01) = 21,666$. Порівняння $\chi^2 > \chi^2 (9; 0,01)$ показує, що вибіркові дані спостережень відповідають нормальному розподілу та узгоджуються з фактичними даними.

В результаті проведених досліджень встановлено, що аналіз випадкових експлуатаційних вибірок експлуатаційних даних про відмови низьковольтної апаратури необхідний для визначення законів розподілу параметрів надійності. При цьому у якості вихідної інформації використано експлуатаційні дані про відмови автоматичних вимикачів та виявлено залежності зміни ймовірності часу безвідмовності апаратів від періоду роботи та ресурсу апаратів. Побудовано теоретична та статистична функції ймовірності безвідмовної роботи апаратів залежно від термінів експлуатації та числа циклів спрацьовування. Показано, що протягом паспортного терміну експлуатації автоматичних вимикачів (10–12 років) ймовірність безвідмовної роботи апаратів не знижується менш ніж до $P=0,85$, що відповідає чинному стандарту на низьковольтні комутаційні апарати.

В результаті обробки статистичної інформації про відмови визначено вигляд розподілу параметрів надійності. За результатами статистичних даних встановлено, що після 17 років експлуатації ймовірність безвідмовної роботи автоматичних вимикачів становила 0,6, а до 20-го року експлуатації знизилася до 0,2. За пропонованим алгоритмом проведено дослідження інших видів низьковольтних електричних апаратів: магнітних пускачів, контакторів, запобіжників, пакетних вимикачів та рубильників. При цьому встановлено, що середній час напрацювання на

відмову становить: для магнітних пускачів та контакторів – 8 років, для запобіжників 22 роки, для рубильників та пакетних вимикачів – 24 роки.

Під наглядом знаходилося близько 250 зразків апаратів кожного типу з різними номінальними струмами. У результаті обчислень та аналізу встановлено, що параметри надійності перерахованих вище апаратів підпорядковуються нормальному розподілу.

Проведені дослідження дозволяють використовувати дані результати з метою коригування термінів проведення планово-попереджувальних ремонтів та своєчасної заміни низьковольтного обладнання для підвищення ефективності його експлуатації.

Оцінка надійності роботи низьковольтних комутаційних апаратів є критично важливою для забезпечення стабільності електричних мереж, особливо в умовах зростання навантаження та інтеграції сучасних технологій. Перехід на гібридну комутаційну систему дозволяє підвищити ефективність роботи цих апаратів, зменшити зношення механічних компонентів і мінімізувати ризик відмов. Це сприяє покращенню експлуатаційних характеристик, зниженню витрат на обслуговування та підвищенню безпеки електропостачання.

1.3. Вибір критерію оцінки технічного стану низьковольтних комутаційних апаратів

Як правило, для наочності рівень надійності під час випробування апарату представляється графічно, де час експлуатації може бути оцінений на підставі практичного досвіду роботи виробу (рис.1.11).

Зазвичай випробуванням піддається новий апарат і таким чином у якій-то мірі імітується період експлуатації, що дорівнює t_1 . Протягом цього періоду у значної частини апаратів найчастіше зношуються контакти, але можуть залишатися у працездатному стані дугогасні пристрої, камери тощо. Очевидно, для визначення електричної довговічності таких

елементів у тому чи іншому режимі може виникнути потреба у продовженні випробувань після заміни контактів, тобто на ділянках t_2 , t_3 тощо [10].

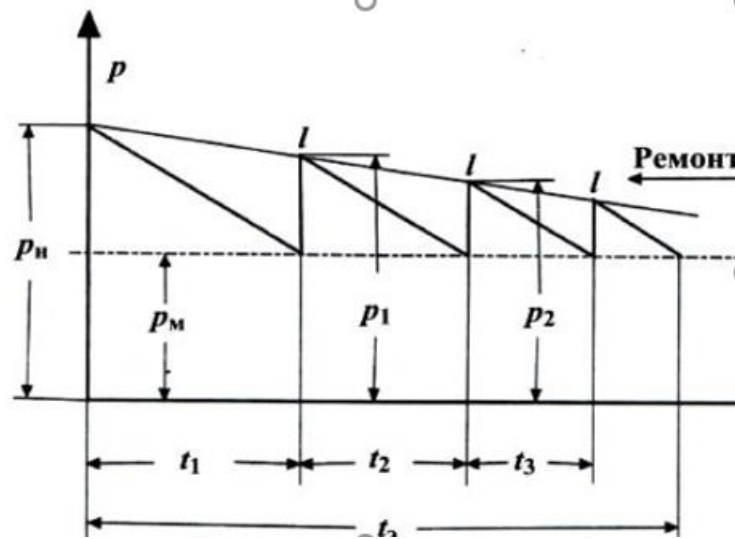


Рисунок 1.11 - Залежність рівня надійності виробів від часу експлуатації:
 p_n – ймовірність безвідмовної роботи (надійності) нового виробу; p_m -
 мінімально допустимий рівень надійності, при якому потрібен ремонт;
 p_2, p_3 - надійність апарату після першого, другого тощо ремонтів; t_1 - час
 експлуатації апарату до першого ремонту; t_2, t_3 - часи експлуатації апаратів
 між ремонтами; t_e – час експлуатації, після якого ремонти стають
 економічно не вигідними

Увага, як правило, звертається на перевірку: початкових та кінцевих натискань контактів, натискання зворотних пружин (там, де вони є), одночасності дотику контактів, чистоту їх обробки та правильності гальванічного покриття.

Оскільки знос контактів суттєво залежить від їх температури та температури безпосередньо з ними дотичних частин, при випробуваннях вимірюються та фіксуються ці температури.

У процесі випробувань на електричну довговічність не повинно бути приварювання контактів або перекриття між полюсами або між полюсами та заземленими частинами. У необхідних випадках проводиться

періодичне очищення контактів і дугогасних камер способами, зазначеними в інструкції з обслуговування апарату.

Оцінка довговічності контактів проводиться, як правило, з провалу контактів. Апарат вважається таким, що витримав випробування на електричну довговічність контактів, якщо після виробництва запропонованої кількості циклів у заданому режимі залишається провал контактів не менше 1/5 початкового (при початковому провалі 2,5мм і більше) та не менше 0,5мм при початковому провалі 2,5мм і менше.

Після відповідного перерахунку слід будувати графік залежності втрати провалу у функції кількості вироблених випробувальних циклів.

У більшості випадків (за винятком періоду опрацювання) цей графік має лінійний характер, що дозволяє користуватися дуже простим та зручним показником зносу контактів, а саме, питомим зносом, що виражається в міліметрів на цикл.

Цей показник розраховується за виразом:

$$i_k = \frac{\Pi_n - \Pi_i}{T_p},$$

де i_k – питомий знос контактів, виражений у міліметрах втрати провалу за цикл; Π_n - провал нових незношених контактів; Π_i - провал зношених (після деякої кількості циклів) контактів, мм; T_p – кількість опрацьованих циклів, після якого зроблено вимір.

У ряді випадків для порівняння різних конструкцій цей показник буває необхідно висловити у відсотках, тобто:

$$i_k (\%) = \frac{\Pi_n - \Pi_i}{T_p \Pi} \cdot 100 = \frac{i_k}{\Pi} \cdot 100,$$

де Π – номінальний провал контактів, мм.

Одне з головних завдань випробувань – необхідність забезпечити єдність випробувань, останнє досягається застосуванням атестованого випробувального обладнання та повірених засобів вимірювань,

застосуванням засобів атестації та перевірки, а також стандартів системи державних випробувань продукції, стандартів державної системи забезпечення єдності виміру, інших стандартів, технічних умов та атестованої методики випробувань.

У принципі, оцінку надійності контактування низьковольтних апаратів здійснюють шляхом вимірювання падіння напруги на випробуваному контакті при комутації випробувального ланцюга та порівняння його із зазначеним пороговим значенням кожного спрацьовування. Якщо падіння напруги на випробуваному контакті перевищує граничне значення, то це вважається збоєм: відмова вважається, що має місце, після накопичення допустимої кількості збоїв на контакт або групу контактів.

Ймовірності збереження опорів комутаційних апаратів у заданих межах при зміні коефіцієнта завантаження наведено на рис.1.12.

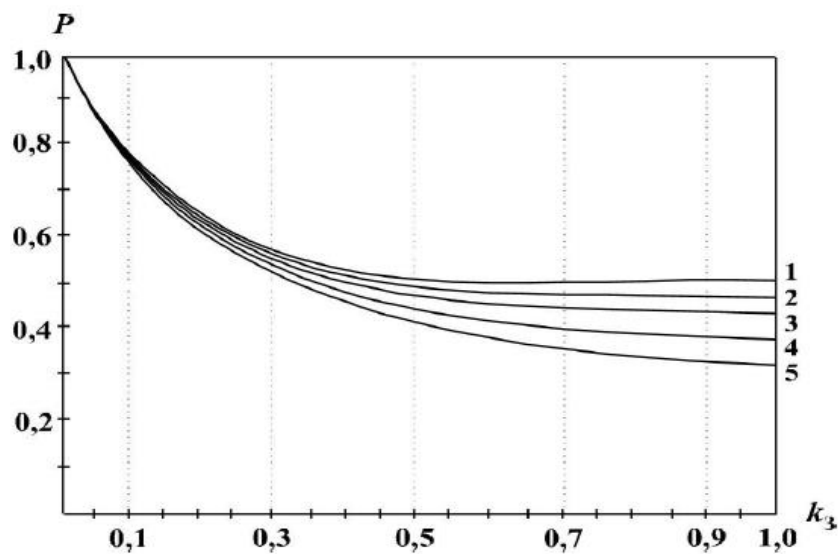


Рисунок 1.12 - Вірогідності збереження опорів комутаційних апаратів низької напруги у допустимих межах у залежності від величини коефіцієнта завантаження: 1 – контактор КТ 6013 ($I_{ном} = 100A$); 2 - магнітний пускач ПМЛ 12 ($I_{ном} = 100A$); 3 – автоматичний 00A); 4 – пакетний вимикач ВП 2-4 ($I_{ном} = 100A$); 5 - рубильник ВР 32-31 ($I_{ном} = 100A$)

В результаті експериментальних досліджень даних термографічного обстеження виявлено критерій оцінки технічного стану низьковольтних комутаційних апаратів, якою виступає опір контактного з'єднання. Цей критерій дозволяє врахувати динаміку зміни величини втрат електроенергії в цехових мережах, що визначається величиною квадрата ефективного струму та еквівалентного опору, включає опір ліній і комутаційних апаратів.

Вибір критерію оцінки технічного стану низьковольтних комутаційних апаратів має ключове значення для впровадження та розвитку гібридної комутації. Точна діагностика технічного стану дозволяє ідентифікувати слабкі місця в роботі апаратів і визначити оптимальні умови їх переходу на гібридні технології. Це сприяє підвищенню надійності, ефективності та довговічності комутаційних систем, забезпечуючи їхню адаптацію до сучасних вимог енергетичних мереж. Таким чином, правильний вибір критеріїв оцінки стає основою для інтеграції інноваційних рішень у галузі комутаційної техніки.

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 1:

Зроблена класифікація низьковольтних електричних апаратів з точки зору різних факторів. Наприклад, результати досліджень низьковольтних комутаційних апаратів, що застосовуються в цехових мережах промислового електропостачання показали, що за конструктивними особливостями апарати можна розділити на три групи: апарати, що мають крім силових контактів у силовому ланцюзі додаткові елементи; апарати, що мають відносно великий опір силового ланцюга; апарати, що мають тільки перехідний опір контактів, такі як рубильники.

Оцінка надійності роботи низьковольтних комутаційних апаратів є критично важливою для забезпечення стабільності електричних мереж, особливо в умовах зростання навантаження та інтеграції сучасних технологій. Перехід на гібридну комутаційну систему дозволяє підвищити ефективність роботи цих апаратів, зменшити зношення механічних компонентів і мінімізувати ризик відмов. Це сприяє покращенню експлуатаційних характеристик, зниженню витрат на обслуговування та підвищенню безпеки електропостачання.

Вибір критерію оцінки технічного стану низьковольтних комутаційних апаратів має ключове значення для впровадження та розвитку гібридної комутації. Точна діагностика технічного стану дозволяє ідентифікувати слабкі місця в роботі апаратів і визначити оптимальні умови їх переходу на гібридні технології. Це сприяє підвищенню надійності, ефективності та довговічності комутаційних систем, забезпечуючи їхню адаптацію до сучасних вимог енергетичних мереж. Таким чином, правильний вибір критеріїв оцінки стає основою для інтеграції інноваційних рішень у галузі комутаційної техніки.

РОЗДІЛ 2. МОДЕЛЮВАННЯ ГІБРИДНИХ СИСТЕМ КОМУТАЦІЙНИХ АПАРАТІВ

2.1. Системний аналіз проблеми моделювання гібридних систем комутації

В даний час в низьковольтному апаратобудуванні формується напрямок зі створення на базі систем автоматичного моделювання та проєктування (САМПР) оптимальних комутаційних апаратів.

У даному дослідженні розглядається стан питання моделювання електричних комутаційних низьковольтних апаратів (НКА). Наукова проблема полягає у розвитку теорії фізико-математичної оптимізації гібридної комутації електричних НКА у напрямку повного виключення дуги з процесу комутації, оптимального без дугового процесу комутації електричного ланцюга постійного струму в умовах взаємопов'язаних фізичних ефектів, які є необхідними для реалізації призначення гібридних НКА. Ця теорія відкриває нові можливості для підвищення техніко-економічних показників шляхом застосування на стадії розробки та проєктування більш досконалих комп'ютеризованих комплексів САМПР.

На сьогоднішній день відсутній єдиний узагальнений закон процесу оптимальної комутації, пов'язаний зі створенням комутаційних НКА. Проблеми без дугової комутації вирішені не повністю, особливо для роботи у вибухонебезпечних середовищах, у космосі при зниженому тиску (вакуум). Ці проблеми можуть бути вирішені в гібридних НКА, що здійснюють практично без дугову комутацію струму, що володіють електричною зносостійкістю, що дорівнює механічній зносостійкості. Закон дозволить знайти найбільш оптимальний процес гібридної комутації як узагальнений критерій. При цьому, ймовірно, буде досягнуто оптимум за всіма параметрами гібридних НКА.

Тому, щоб повною мірою використати переваги гібридного принципу комутації, необхідно створити відповідний оптимальний закон без дугової

гібридної комутації НКА. Аналіз літературних джерел показав, що публікації з цієї наукової проблеми практично немає. Це може бути пояснено недостатньою інформаційною доступністю таких досліджень.

При створенні комутаційного НКА, що відповідає поставленій меті, найбільш ефективним може виявитися шлях створення комутаційних гібридних апаратів (ГА), що працюють із заданим, близьким до оптимального законом без дугової гібридної комутації [11]. При цьому, чим сильніше пригнічується електрична дуга в гібридній системі комутації ГА, тим він складніше, отже, має існувати оптимальне рішення за критерієм мінімізації конструктивної маси при заданій температурі охолоджувача силового транзисторного ключа (СТК). Об'єктивність оптимального синтезу багато в чому залежить від вибору параметрів (критеріїв), за якими проводиться оптимізація: наявність фізичного сенсу, простоти обчислення, універсальності чи повноти характеристики об'єкта.

Враховуючи складність процесів гібридної комутації НКА, отримати оптимальний варіант без дугової гібридної комутації при мінімальних витратах часу можливе у разі, якщо дослідження проводити з використанням математичної теорії експерименту, на основі його планування та проєктування. Засобом вирішення наукової проблеми є в даній роботі постановка задачі системного синтезу ГА, яка заснована на наступних принципах [12]:

- 1) при проєктуванні гібридних НКА задача оптимізації зводиться до мінімізації їх конструктивної маси з використанням повних математичних моделей всієї гібридної системи;

- 2) мінімізувати конструктивну масу ГА можливо за заданої температури охолоджувача;

- 3) є раціональною багатокритеріальна фізико-математична оптимізація гібридних НКА: за масою, керуванням, мінімальним рівнем енерговиділення в дузі відключення, гранично можливого рівня

перенапруги, надійності, якщо ставити та вирішувати завдання структурної оптимізації ГА у складі автономних систем електропостачання;

4) оптимізація ГА за надійністю та гранично можливим рівнем перенапруги має практичний зміст, але в такому разі ГА, оптимізовані під одну конкретну систему, виявляться неоптимальними для інших.

Тому і гранично можливий рівень перенапруги, і надійність гібридних НКА доцільно прийняти як обмеження багатокритеріальної задачі оптимізації.

Електрична і теплова підсистеми пов'язані між собою через потужність теплових втрат у СТК. В основу синтезу покладено умову, що номінальні перехідні струми навантажень не повинні розігрівати силові елементи ГА, зокрема СТК, до граничних температур, тому основним методом проектування ГА за критерієм мінімуму маси є чисельне рішення рівнянь повної математичної моделі в рамках спеціалізованої машинної програми синтезу – САМІР.

Для досягнення поставленої мети, яка має призвести до реалізації закону оптимальної без дугової гібридної комутації НКА, необхідне рішення наступних завдань:

а) розробка методу моделювання гібридної системи як сукупності взаємодіючих підсистем різної фізичної природи, що відображає процеси комутації взаємопов'язаних гібридних підсистем ЕМК-СТК;

б) розробка класифікації повної математичної моделі. Ця класифікація систематизує модель в залежності від допустимого рівня дугоутворення, гарантуючого достатній ступінь стійкості, надійності та повного виключення дуги з процесу комутації, що, у свою чергу, необхідно для розробки, проектування та створення оптимальних гібридних НКА.

Завдання структурного синтезу полягає у виборі оптимальної структури виконавчого електромагнітного приводу гібридних НКА для

виконання закону без дугової комутації на основі відомих методів пошуку екстремуму функції декількох змінних [13].

Завдання параметричного синтезу включає рішення двох підзадач: вибір параметрів ланок виконавчого електромагнітного приводу гібридних НКА та формування функцій управління ЕМК-СТК. Сумісне виконання функцій ЕМК-СТК забезпечить здійснення заданої без дугової комутації. Є принципова можливість отримання конструкції гібридної системи, що керується – ЕМК-СТК гібридної комутації електричного ланцюга постійного струму реалізує процес відключення, близький до оптимального завдяки простоті схем. Проведений системний аналіз дозволяє вирішити задачу визначення оптимальної гібридної без дугової комутації.

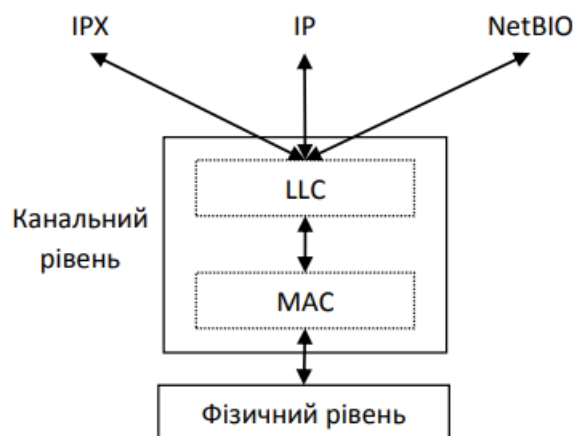


Рисунок 2.1 – Схема інтерфейсу

Сформульовано завдання моделювання електричних гібридних НКА як сукупності підсистем різної фізичної природи. Запропоновано методику математичного моделювання гібридних систем, яка заснована на поетапному синтезі та аналізі ГА, що задовольняють заданому закону без дугової комутації. Вирішені основні завдання поставленої проблеми з системного аналізу, структурного та параметричного синтезу, кінцевою метою якої є розробка універсального комплексу комп'ютерного моделювання та проектування (САМПР), що дозволяє створити керовану

гібридну систему, «ідеальну» з погляду заданих критеріїв закону без дугової гібридної комутації.

2.2. Аналіз фізичних процесів зносу електричних контактів комутаційних низьковольтних апаратів

Комутуючі контакти НКА можуть перебувати у двох можливих станах: розімкнутому і замкнутому. Дуже важливим для характеристики їхньої працездатності є процеси переходу з одного стану в інший і навпаки. У процесі замикання відстань між контактами зменшується, при досягненні деякої відстані між ними створюються умови для пробоя і виникає дуга замикання, після дотику контактів дуга гасне. Якщо у цьому випадку має місце вібрація контактів (брязкіт), то при кожному розриві ланцюга знову виникають електричні розряди, які призводять до ерозії контактів або можуть бути причиною їх зварювання.

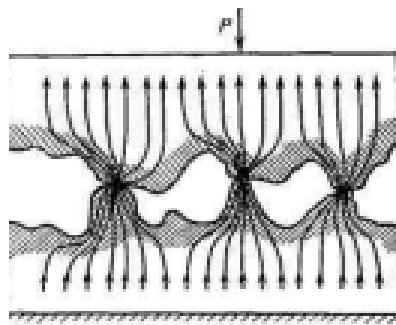


Рисунок 2.2 – Зіткнення електричних контактів

Величина ерозії при замиканні контактів залежить як від струму, що відключається, так і від часу вібрації контактів, тобто, часу, протягом якого на контакти впливають електричні розряди. Тому радикальним методом підвищення надійності та збільшення терміну служби контактної НКА є зменшення тривалості горіння електричної дуги до її повного виключення з процесу комутації [14].

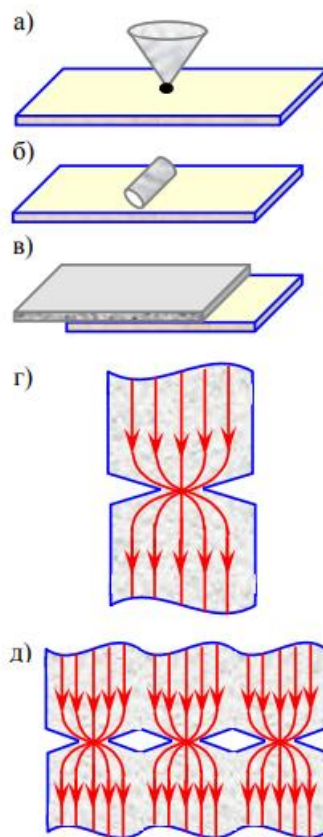


Рисунок 2.3 - 1 Типи контактів і картина контактування

За формою контактування розрізняють три види контактів: крапковий, лінійний, поверхневий.

Можна виділити такі основні фактори, що впливають на фізичний процес електричного зношування контактів комутаційних НКА: 1) конструктивні параметри; 2) параметри ланцюгів електромагнітного приводу; 3) властивості матеріалу контактів; 4) параметри та особливості дугогасіння; 5) параметри комутованого електричного ланцюга; 6) параметри режиму роботи; 7) параметри навколишнього середовища.

Ерозія контактів пов'язана з їх руйнуванням, що є наслідком створення контактної перешийки (містка) з розплавленого матеріалу контактів у початковій стадії їх розбіжності, що супроводжується перенесенням матеріалу з одного контакту на інший. При струмах вище мінімальних, коли між контактами вже виникає дуга розмикання, характерною є ерозія катода, яка відбувається внаслідок бомбардування катода позитивно зарядженими іонами і практично не залежить від нагріву

контактів. Величина напруги не впливає на знос контактів при замиканні, однак при напрузі нижче 24 В знос може суттєво зменшитися через вплив опору дуги на струм при вібрації контактів. При розмиканні напруга може впливати на знос контактів, якщо воно впливає на час знаходження дуги на робочій поверхні контакту та на струм у дузі. Чим вище піки напруги, тим більше енергія і тривалість горіння дуги розмикання і тим більше знос контактів. При збільшенні індуктивності ланцюга підвищуються піки напруги і тривалість горіння дуги, що сприяє ерозії та зносу контактів (особливо при постійному струмі).

Знос контактів слабо точних апаратів при замиканні та розмиканні ланцюга, в якому електрична дуга не утворюється, практично нікчемний. За наявності дуги зазвичай обидва контакти втрачають матеріал. Конструкція комутаційного НКА повинна бути такою, щоб зношування електричних контактів протягом передбаченого числа комутацій не призводив до порушення його роботи. Величину зносу контактів оцінюють за втратами маси або обсягу, або за лінійною зміною сумарної висоти контактної пари, яка визначається за зміни величини провалу контактів[15].

Відомо, що кожного разу, коли величина струму в ланцюгу і напруга на дуговому проміжку перевершують свої мінімальні значення, слідом за вибухом рідкого металевого містка між контактами формується спочатку коротка, а потім плазмова дуга.

Діаграма поділу місткової та дугової стадій ерозії схематично представлено на рис. 2.4.

В області 1 ($U < U_0$ при всіх значеннях I , а також $I < I_0$ при $U < 300$ В) явища газового розряду відсутні. У цьому випадку структурні порушення контактної поверхні з'являються внаслідок місткового перенесення матеріалу.

При збільшенні напруги ланцюга до значень $U > U_0$ при струмі $I > I_0$ відбувається перехід розряду спочатку до нестационарної (область 2), а

потім до стаціонарної дуги розмикання (область 4). Мінімальний струм дуги I_0 (струм зрізу) для різних металів лежить у межах 0,5–10 А. Забруднення поверхні контактів (окислення), як правило, веде до зменшення мінімальних значень струму та напруги дуги.

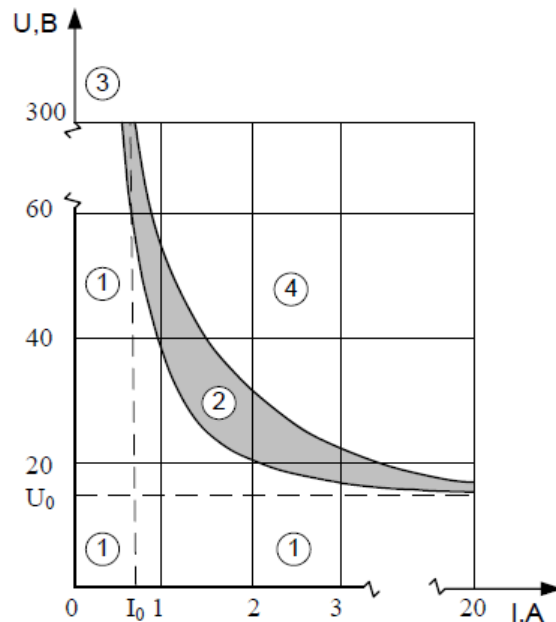


Рисунок 2.4 - U–I діаграма поділу місткової та дугової стадій ерозії контактів

Істотний інтерес представляє такий параметр, як час існування короткої дуги при відключенні контактами ГА постійного струму, що надає вплив на величину ерозії контактів у цій стадії. Під час існування короткої дуги спостерігається феномен нерухомості опорних точок дуги, в зоні яких відбувається інтенсивне електричне зношування контактів – зміна їх геометрії та обсягу за рахунок випаровування та місткового перенесення матеріалу.

Розглянемо основні особливості комутаційних:

1) падіння напруги на увімкненому апараті визначається контактною групою електромеханічного приводу (ЕМП), і тому його значення мало, одночасно усувається недолік безконтактного апарату - значне падіння напруги на відкритих СПП;

2) СПП з паралельним (шунтуючим) включенням у ГА працюють у короткочасних режимах. Це дає можливість застосовувати СПП на номінальні струми набагато менше ніж відключаються;

3) імпульсний режим роботи СПП дозволяє позбутися громіздких систем їх охолодження і тим самим значно знизити габарити, вагу та вартість ГА;

4) у ГА можливе електричне відділення навантаження від мережі при застосуванні мосткових головних контактів із двома розривами або допоміжних контактів ЕМП;

5) при включеному ГА шунтуючі СПП захищені від дії тривалих перевантажень по струму та від надструмів наскрізних коротких замикань;

6) так як контакти ГА практично не беруть участь у процесі комутації, їх електричний знос близький до механічного;

7) електричні контакти ГА в процесі розмикання піддаються дії мосткової ерозії від короткої дуги.

Існуючі схеми без дугової комутації не виключають появи короткої дуги, що відображається на терміні служби та надійності роботи електричних контактів ЕМП у ГА.

Поряд із цим слід зазначити переваги нового покоління ГА:

а) у порівняно простих оригінальних схемах без дугової комутації, захищених патентами, досягнуто оптимальне управління керованого силового транзисторного ключа (СТК), яке повністю виключає електричну дугу з процесу гібридної комутації;

б) перспективні ГА, які працюють із заданим законом без дугової комутації, побудовані на новому способі гібридної комутації, основою якої є ідея послідовного з'єднання повністю керованих СТК з контактами ЕМП;

в) відсутність електричної дуги при комутації дозволяє застосовувати ГА для роботи у вибухонебезпечних середовищах (або повне виключення її виникнення) дає можливість у певних випадках відмовитися від громіздких та складних дугогасних пристроїв.

Таким чином, порівняно з відомими способами гібридної комутації, побудованої на принципі шунтування контактів ЕМП некерованими СПП, ГА нового покоління побудовані на перспективному способі без дугової гібридної комутації, в основу якої покладена ідея послідовного з'єднання повністю керованих СТК з контактами ЕМП.

У практичному аспекті розглянуто проблеми гібридних НКА у зв'язку з ерозійними процесами, сформульовані завдання та зазначені напрями їх дослідження в умовах без дугової комутації при розмиканні електричних контактів низьковольтних сильноточних ланцюгів постійного струму, розв'язання яких перебуває у прямому зв'язку зі створенням закону гібридної комутації.

В даний час назріла необхідність створення нового покоління ГА, які працюють із заданим законом без дугової гібридної комутації. З цією метою необхідно поетапно провести науково-дослідні та дослідно-конструкторські роботи в рамках теоретичних та експериментальних досліджень щодо підвищення комутаційної зносостійкості ГА, оптимізації електромеханічної контактної та безконтактної систем, вибору контактних матеріалів з мінімальним електричним зносом та захистом контактів від вібрації.

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 2:

Сформульовано завдання моделювання електричних гібридних НКА як сукупності підсистем різної фізичної природи. Запропоновано методику математичного моделювання гібридних систем, яка заснована на поетапному синтезі та аналізі ГА, що задовольняють заданому закону без дугової комутації. Вирішені основні завдання поставленої проблеми з системного аналізу, структурного та параметричного синтезу, кінцевою метою якої є розробка універсального комплексу комп'ютерного моделювання та проектування (САМПР), що дозволяє створити керовану гібридну систему, «ідеальну» з погляду заданих критеріїв закону без дугової гібридної комутації.

ГА нового покоління побудовані на перспективному способі без дугової гібридної комутації, в основу якої покладена ідея послідовного з'єднання повністю керованих СТК з контактами ЕМП.

У практичному аспекті розглянуто проблеми гібридних НКА у зв'язку з ерозійними процесами, сформульовані завдання та зазначені напрями їх дослідження в умовах без дугової комутації при розмиканні електричних контактів низьковольтних сильноточних ланцюгів постійного струму, розв'язання яких перебуває у прямому зв'язку зі створенням закону гібридної комутації.

В даний час назріла необхідність створення нового покоління ГА, які працюють із заданим законом без дугової гібридної комутації. З цією метою необхідно поетапно провести науково-дослідні та дослідно-конструкторські роботи в рамках теоретичних та експериментальних досліджень щодо підвищення комутаційної зносостійкості ГА, оптимізації електромеханічної контактної та безконтактної систем, вибору контактних матеріалів з мінімальним електричним зносом та захистом контактів від вібрації.

РОЗДІЛ 3. ШЛЯХИ РОЗВИТКУ НИЗЬКОВОЛЬТНИХ ГІБРИДНИХ КОМУТАЦІЙНИХ АПАРАТІВ

3.1. Основні тенденції інноваційного розвитку комутаційних апаратів нового покоління

В останні роки у всіх галузях промисловості з зростаючою гостротою ставиться проблема необхідності заміни старіючого електрообладнання, а саме традиційних електромеханічних апаратів на комутаційно-захисні апарати нового покоління, які мають більш високі техніко-економічні показники.

Основні причини порушення комутаційної здатності електричних апаратів, що працюють в умовах утворення стабільної дуги на контактах, - ерозія, корозія та зварювання. Наявність дуги та швидкий знос контактів, що виконуються з міді, срібла або гостродефіцитних сплавів, робить контактні апарати малонадійними в експлуатації [16]. Крім того, електрична дуга не дозволяє застосовувати зазначені апарати в умовах підвищеної пожежо- та вибухонебезпечності. Проблема усунення дуги з процесу комутації, створення вискоєфективних комутаційно-захисних апаратів нового покоління відповідає вимогам, що підвищуються, до сучасного електротроапаратобудування щодо електроустаткування, розрахованого на комутацію струмів у кілька десятків і сотень ампер.

Радикальним вирішенням усіх цих проблем є усунення електричної дуги із процесу комутації на основі сучасних технологій. Пошук шляхів вирішення проблеми у нас в країні і за кордоном привів до використання можливостей використання силової напівпровідникової електроніки, що дозволяє якісно змінити характеристики комутаційно-захисних апаратів та надати їм нові функції та властивості.

Об'єднання контактних і безконтактних комутаційних апаратів, поєднуючих позитивні властивості тих та інших, призвело до створення принципово нового електричного апарату – так званого гібридного апарату. У таких апаратах практично повністю усувається електрична дуга на контактах, знижуються масогабаритні показники завдяки виключенню громіздких дугогасних пристроїв, знижуються теплові втрати, підвищуються зносостійкість, надійність і довговічність [13].

Одним із шляхів удосконалення контактних комутаційних апаратів є обмеження або повне усунення утворення дуги на головних контактах за допомогою силових напівпровідникових приладів, що використовуються у ГА. У цьому значне зниження вмісту срібла в контактах електричних апаратів може бути досягнуто при переході від традиційних рішень дугогасіння до інноваційних принципів бездугової комутації.

Представлений алгоритм роботи із заздалегідь заданим законом комутації силового напівпровідникового приладу (СПП) (2) з головними контактами (ГК) першої (1) та другої (3) пари дистанційного перемикача серії ДП1 (8) з метою забезпечення бездугової комутації електричних ланцюгів постійного та змінного струму (рис.3.1).

Наведено схему ГА для бездугової комутації при послідовно-паралельному з'єднанні СПП та ГК.

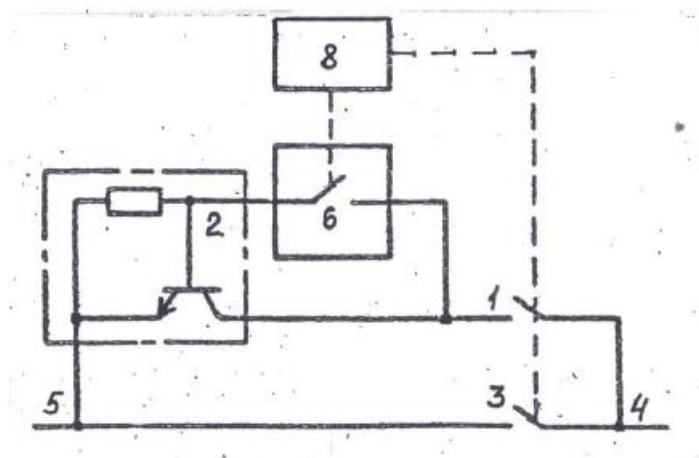


Рисунок 3.1 - Електрична схема ГА для бездугової комутації електричного ланцюга при послідовно-паралельному з'єднанні СПП та ГК

По команді на включення привід (8) замикає спочатку першу пару контактів (1), при цьому одночасно відбувається вплив на датчик (6), який спрацьовує і включає СПП (2), після чого замикається друга пара контактів (3), внаслідок чого забезпечується бездугове замикання пар контактів. При подачі команди на відключення вся послідовність операцій відбувається у зворотному порядку: привід (8) розмикає спочатку другу пару контактів (3) з витримкою часу на розмикання, потім першу пару контактів (1), також із витримкою часу. В інтервалі часу між розмиканням пар контактів спрацьовує датчик (6) і включається СПП (2), забезпечуючи бездугове розмикання пар контактів, що полегшує створення ГА, що працює із заданим законом комутації.

Пошук інноваційних шляхів при переході від традиційних рішень гасіння дуги ГА до нових принципів бездугової комутації призвів до використання можливостей силової електроніки - на принципі використання силових транзисторів, де є бездуговий ГА, що працює із заданим, близьким до оптимального, законом комутації, який полягає в тому, що ГА, що містить дві пари контактів (1) та (2) з різним часом спрацьовування, привод (3) зазначених контактів, СПП (4), підключений силовим виводам через контакти першої пари (1) паралельно другій парі контактів (2), забезпечений третьою парою контактів (9), виведення однієї з контакт-деталей якої підключений до керуючого виводу зазначеного СПП, а вивід другий контакт-деталі – до загальної точки з'єднання виводів контакт-деталей першої та другої контактних пар. Причому третя контактна пара (9) розташована щодо першої (1) та другої (2) контактних пар таким чином, що її замикання забезпечується після замикання першої пари контактів (1), розмикання – після розмикання другої пари контактів (2), а СПП (4), у якості якого використаний транзисторний модуль, виконаний у гібридному виконанні та розташований або на одному з контактів або на його утримувачі контактів, або на загальному тримачі контакт-деталей трьох контактних пар, електрично ізольованих один від

одного. При цьому силовий транзисторний модуль виконаний з паралельно з'єднаними множинами транзисторних структур, що дозволяє досягти практично нульового падіння напруги, який можна вбудовувати в ланцюг ГК або встановлювати безпосередньо на самому контакті, як, наприклад, на схемі.

На рис.3.2 наведена електрична схема ГА з бездуговою комутацією електричного ланцюга, в якому як електромеханічний апарат використаний дистанційний перемикач серії ДП1 (3), а як СПП – силовий транзисторний модуль (4).

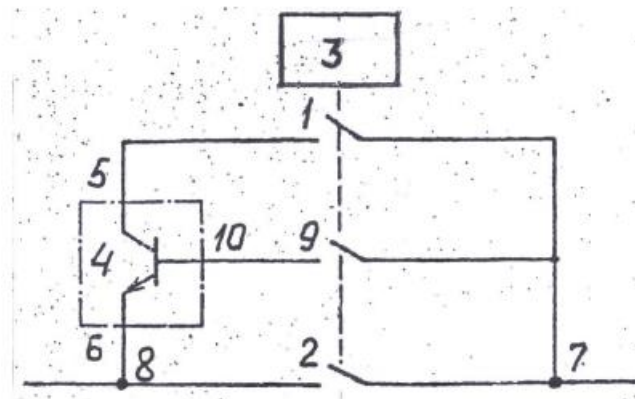


Рисунок 3.2 - Електрична схема ГА з бездуговою комутацією електричного ланцюга

Використання модульного принципу побудови дозволяє створювати ГА з блоками, що легко замінюються, істотно розширюють їх функції. Цей принцип побудови є перспективним напрямом створення апарату нового типу з бездуговою комутацією, призначеного для роботи в автономних об'єктах підвищеної надійності.

Це відкрило можливість розробки керованих комутаційно-захисних ГА нового покоління з послідовним включенням нормально відкритих СПП та ГК. Поява нормально відкритих СПП, таких як SIT-транзистори, на основі карбіду кремнію [14], що мають низький початковий опір, незначне падіння напруги у провідному стані, високі радіаційну стійкість,

пробивні напруги та робочу температуру, створило можливість розробки простих і надійних ГА з послідовним включенням ГК та СПП.

На рис.3.3 і 3.4 представлені варіанти ГА для бездугової комутації електричного ланцюга за технічним рішенням, в якому заявлений алгоритм раціонального закону бездугової комутації з управлінням. ГА містить підключений до виводів (1) і (2) джерело живлення, послідовно з'єднане навантаження (3), керований напівпровідниковий ключ, що вимикається по керуючому електроду (4) та контакти (6).

Завдяки підключення керуючого електрода напівпровідникового ключа до виведення контактів (рис.3.3) або виводу, розташованому між двома їх розривами (рис.3.4), в аналізованому ГА, не порушивши необхідного для бездугової комутації послідовного з'єднання контактів із силовим ланцюгом напівпровідникового ключа, утворено нове (паралельне) з'єднання контактів (рис.3.3) або одного з розривів (рис.3.4) з вхідним ланцюгом, вимикається по керуючому електроду напівпровідникового ключа, що керується, за допомогою якого при розмиканні забезпечується автоматичне керування вимкненням відкритого напівпровідникового ключа.

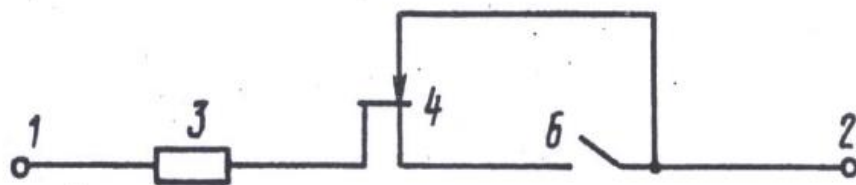


Рисунок 3.3 - Електрична схема ГА для бездугової комутації електричного ланцюга для варіанта виконання контактів з одним розривом

При цьому у якості відкритого ключа використовується або нормально відкритий напівпровідниковий прилад, наприклад, транзистор зі статичною індукцією (рис.3. 3), або нормально закритий двоопераційний напівпровідниковий прилад, наприклад, тиристор, що замикається

(рис.3.4), з ланцюгом відмикаючого прилад сигналу, виконаного на резисторі 5, контакти 6, виконані з одним (рис.3.3) або, з метою забезпечення відключеного стану гальванічної розв'язки навантаження від джерела живлення, з двома розривами, наприклад, місткового типу (рис.3.4), причому напівпровідниковий ключ приєднаний до виводів контактів силовим електродом, який у сукупності з електродом, який управляється, утворює вхідний ланцюг ключа.

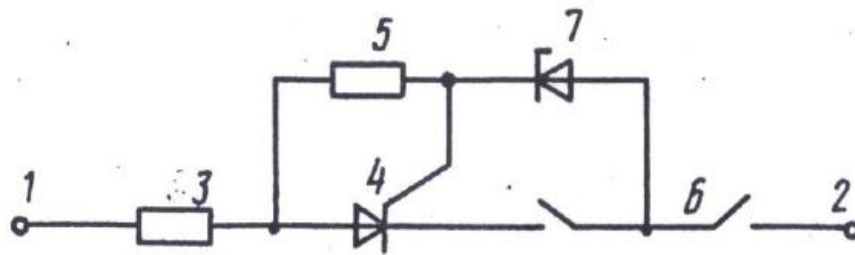


Рисунок 3.4 - Електрична схема ГА для бездугової комутації електричного ланцюга для варіанта виконання контактів із двома розривами

Керуючий електрод напівпровідникового ключа для варіанта виконання контактів з одним розривом підключений до іншого виведення контактів (рис.3. 3), а для варіанту виконання контактів місткового типу з двома розривами – виводу, розташованому між розривами контактів (рис.3.4).

У таких ГА можна використовувати одночасне переривання струму ГК і СПП, у зв'язку з цим схему управління СПП вдається виконати також гранично простою без застосування додаткових елементів, забезпечивши тільки електричний зв'язок керуючого електрода СПП з одним із контактів.

Отримані результати дозволяють створити керований бездуговий гібридний апарат нового покоління, що працює із заданим, близьким до оптимального, законом комутації.

3.2. Створення нового покоління гібридних апаратів з бездуговою комутацією для спеціальної техніки

Якщо уявити комутаційний апарат у вигляді електромеханічного контактного апарата та безконтактного силового напівпровідникового ключа, то процес електронізації комутаційної низьковольтної апаратури в даний час розвивається за наступними п'ятьма напрямками:

1) створення безконтактних (статичних) апаратів, що не мають рухомих частин та дугогасних камер, в яких силовий напівпровідниковий прилад (СПП) не тільки бере участь у комутації струму, а й тривалий час проводить струм навантаження. Головна перевага безконтактних апаратів у тому, що вони здатні поєднувати в собі функції швидкодіючого струмообмежувального апарату захисту та управління з виконанням не тільки комутаційних операцій «включено-вимкнено», а й складніших – здійснювати плавний пуск та регулювання швидкості електродвигуна [15];

2) створення статичних пристроїв управління, здатних виконувати комплексний захист електроустаткування від аварійних режимів роботи та різко покращувати якість захисту;

3) створення гібридних апаратів на основі мікро електромеханічних систем (МЕМС) та мікро реле.

Технічне рішення для бездугової комутації, запропоноване на рис.3.5, представлено спрощеною структурною схемою ГАШ, що містить електромагнітне двостабільне реле з одним входом управління 1, контакти 2, керовані двостабільним реле 1, керований напівпровідниковий ключ 3, який при знятті з керуючого входу команди управління приймає відключений стан. При подачі на вхід управління гібридного апарату команди управління на увімкнення або вимкнення, здійснюється одночасна подача команди управління на вхід управління двостабільного реле 1 та керуючий вхід силового напівпровідникового ключа 3, швидкодія керованого напівпровідникового ключа 3 значно вище, ніж дія

електромагнітного реле 1, тому включення та відключення напівпровідникового ключа 3 відбувається до замикання або розмикання контактів 2, забезпечуючи бездугову комутацію електричного ланцюга, володіючи простотою технічного рішення та високою надійністю.

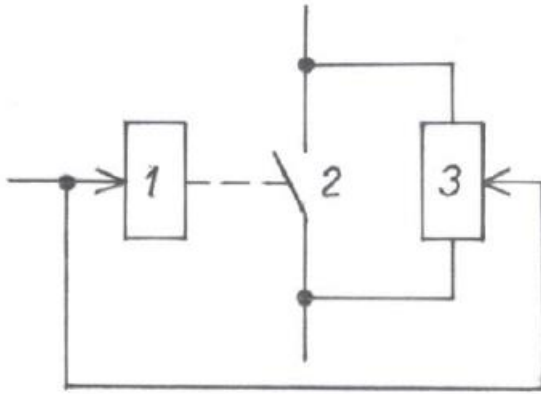


Рисунок 3.5 - Структурна схема ГАШ з одним входом управління

Функціональна схема ГАШ, в якому використаний електромагнітний привід 1 поворотного типу з містковою контактною системою, встановлений на підставці, на якій закріплені виводи 3 і 4 нерухомих контактів 5 і 6, відповідно, і виводи 7 ланцюга управління містка, пластина 8, що складається з розширеної частини 9 з встановленими контакт-деталлями 10 і 11 і ділянки 12, розташованої між вигнутої (гофрованої) 13 і розширеної частинами 9 пластини 8, закріпленої на ізоляційній рухомій частині 14 електромагнітного приводу 1, керований напівпровідниковий ключ 15, підключений керуючим електродом 16 виводу 7 ланцюга управління містка, а виводами 17 і 18 силового ланцюга - до виводів 3 і 4 нерухомих контактів 5 та 6, наведена на рис.3.6.

Включення (відключення) керованого напівпровідникового ключа 15 здійснюється або від напруги мережі, або від напруги, яка прикладається до керуючого електроду 16 напівпровідникового ключа 15, який включається і забезпечує за рахунок своєї швидкодії бездугове замикання (розмикання) електричного ланцюга.

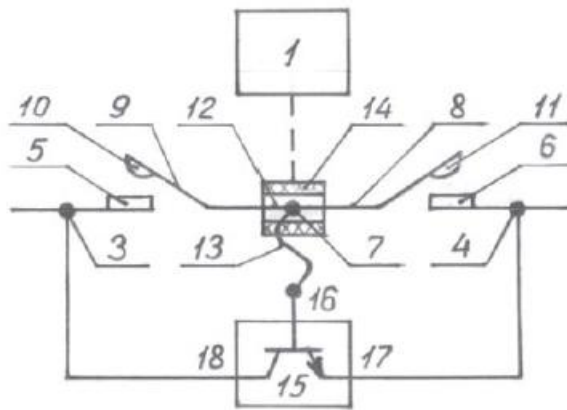


Рисунок 3.6 - Функціональна схема ГАШ із контактною системою місткового типу

Порівняно з відомими апаратами виконання конструкції місткового рухомого контакту та виведення ланцюга управління у вигляді єдиної деталі забезпечує спрощення контактної місткової системи з двома розривами за рахунок виключення трудомістких деталей багатoelementного струмознімання управління з рухомого місткового контакту.

Технічні рішення виконання комутаційних апаратів з бездуговою комутацією, засновані на використанні останніх досягнень силової електроніки, що розвивається, мають велику перспективу при розробці нових поколінь ГА на підвищені напруги та струми, а також з розширеним температурним діапазоном. Найближчим часом на ринку планується поява високотемпературних VJFE-транзисторів на основі карбіду кремнію (SiC), що мають робочу температуру до 600-700 ° C та робоча напруга до 3,5 кВ.

У разі серійного освоєння VJFE-транзисторів з'явиться можливість вбудовувати їх в ланцюг ГК або безпосередньо встановлювати на силовому головному контакті, яке відкрило можливість створення інтегрального комбінованого керуваного ключа. У зв'язку з цим схема управління силовим напівпровідниковим ключем у цьому пристрою проста, без застосування додаткових елементів, вона забезпечить тільки електричний зв'язок керуючого електрода силового напівпровідникового

ключа з одним із контактів місткового типу. Конструктивна схема наведена на рис. 3.7.

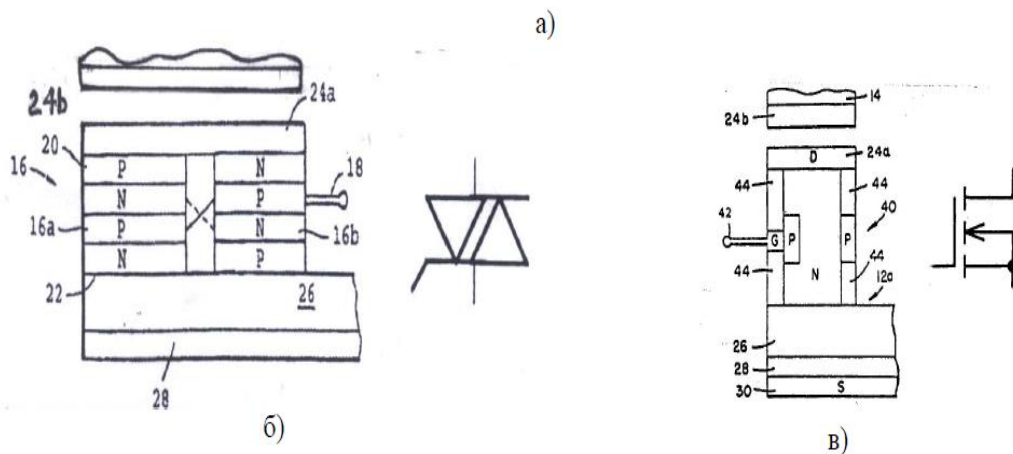


Рисунок 3.7 - Конструктивна схема керованого комбінованого електричного контакту

Спосіб збільшення комутованої потужності на основі паралельно-послідовного з'єднання контактів мікрореле: під час комутації контакти виявляються перевантаженими внаслідок неможливості забезпечення повної синхронізації замикання (розмикання) великої кількості контактів, що важко виконати з точки зору забезпечення надійності. У зв'язку з цим використання мікрореле найбільш актуально та ефективно у поєднанні з нормально-відкритими польовими транзисторами в гібридних апаратах бездугової комутації.

При виконанні в перспективі SIT-транзисторів із ізолюваним затвором у відключеному стані буде досягатися практично нульовий струм витоку. Необхідно відзначити, що це комбіноване реле не має технічних обмежень і для досягнення практично нульового залишкового падіння напруги у включеному стані за рахунок паралельного з'єднання безлічі транзисторних структур з нормально відкритим каналом.

У зв'язку з цим даний гібридний апарат, що дозволяє досягати близьких до нульових значень струм витоку у відключеному стані та залишкове падіння напруги у включеному стані, можна віднести до ряду

перспективних варіантів створення «ідеального ключа», здатного працювати із заданим законом комутації.

Схема ГАП з бездуговою комутацією електричного ланцюга для перемикання двох навантажень представлено на рис.3. 8.

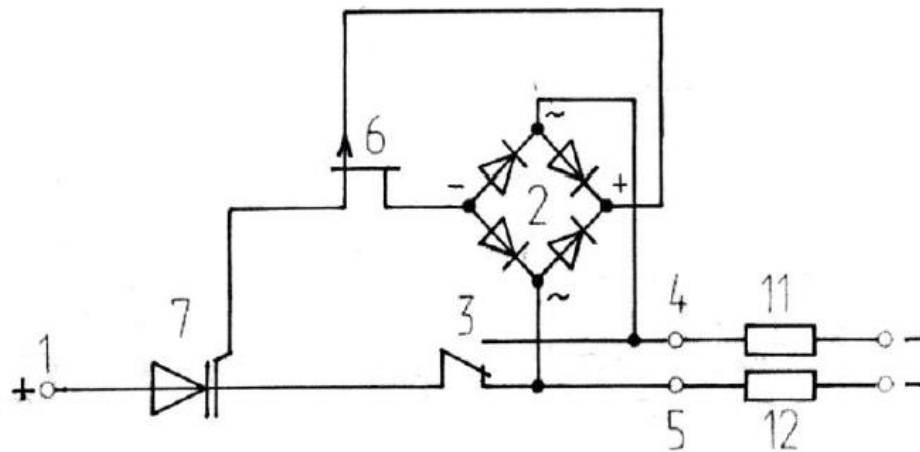


Рисунок 3.8 - Електрична схема силового вузла ГАП для перемикання двох навантажень

Створені низьковольтні гібридні комутаційні апарати нового покоління, які працюють із заданим законом бездугової комутації.

Але реалізація оптимального закону бездугової комутації можлива тільки за наявності силового «ідеального комбінованого ключа» і повністю керованого інтелектуального інтегрального гібридного комутаційного апарату.

Створення нового покоління гібридних низьковольтних апаратів з бездуговою комутацією є важливим кроком у підвищенні надійності, ефективності та безпеки електроенергетичних систем. Використання технологій бездугової комутації дозволяє значно знизити рівень зносу контактних елементів, зменшити втрати енергії та забезпечити стійкість роботи обладнання у широкому діапазоні навантажень.

Це відкриває нові можливості для інтеграції розподілених енергоресурсів (DER) у мережу та сприяє розвитку розумних електромереж.

3.3. Перспективи розвитку низьковольтних комутаційних гібридних апаратів

Технічний рівень вітчизняних комутаційних апаратів за рядом показників поступається рівню зарубіжних аналогів, зокрема за кількістю спрацьовувань низьковольтної комутаційної апаратури. Незважаючи на такий стан справ з їх розробкою та виробництвом, вимоги до сучасної комутаційної апаратури продовжують неухильно зростати.

Принципово нові гібридні апарати (ГА) із компонентами, що використовують нетрадиційні засади бездугової гібридної комутації, відповідають вимогам електрообладнання, призначеного для застосування в бортових системах електропостачання з тривалим терміном функціонування.

Метою досліджень цього розділу є обґрунтування перспективності наряду створення високо ресурсних багатофункціональних комутаційних ГА нового покоління, призначених для оперативної комутації та захисту електроенергії в автономних системах електропостачання. Особлива увага приділяється розв'язанню задачі повного усунення дуги з процесу комутації, сюди входять схемні технічні способи та конструктивно-технологічні підходи. Розглядається проблема пошуку оптимального управління комутаційними процесами гібридної комутації електричних кіл.

Досліджуються інженерні шляхи повного або часткового усунення електричної дуги з процесу гібридної комутації, яка є одним з найважливіших факторів забезпечення надійності та підвищення ресурсу комутаційних ГА нового покоління призначених для оперативної

комутації та захисту електричних ланцюгів постійного струму. Аналіз розробок у цій галузі науки показав, що в даний час відомі чотири основні принципи гібридної комутації:

1. Принцип паралельної (шунтуючої) побудови ГА - ЕМК електромагнітного апарату, що приєднуються паралельно СПП безконтактного апарату.

2. Принцип паралельно-послідовної побудови ГА – одна пара ЕМК електромагнітного апарату з'єднується паралельно з керованим СПП безконтактного апарату, а друга пара ЕМК з'єднується послідовно з СПП безконтактного апарата;

3. Принцип послідовної побудови ГА – ЕМК електромагнітного апарату, що з'єднуються послідовно з повністю керованим силовим транзисторним ключем (СТК).

4. Принцип каскадної побудови гібридної (SiC-Si): СТК – високовольтний транзистор VJFET (SiC) і низьковольтний MOSFET (Si) об'єднуються каскадно з кристалами окремих приладів за гібридною технологією. На цьому принципі перспективним бачиться також побудова ГА, коли нормально відкритий СТК з'єднується з низьковольтним ЕМК на основі використання мікро електромеханічних систем (MEMS) у поєднанні з мікро системною технікою (МС).

ГА з СТК можна виконувати з бездуговою комутацією через повну керованість транзисторів. При цьому на основі загальної теорії оптимального управління критеріями оптимальності при відключенні можуть бути мінімальні перенапруги на контактах при заданому часі відключення та мінімальному часі включення при заданій допустимій перенапрузі на елементах, що вимикаються. Досягнення зазначених параметрів процесу відключення можливе лише при суворо певних законах зміни як струму, так і напруги на контактах протягом усього процесу відключення. Оскільки оптимальний (у сенсі швидкодії) процес без дугового розриву ланцюга постійного струму є окремий випадок

ідеального процесу, трактування поняття оптимального процесу може бути дано за допомогою математичного апарату з використанням ЕОМ.

ГА з формуванням сигналу безконтактним датчиком наведено на рис. 3.9.

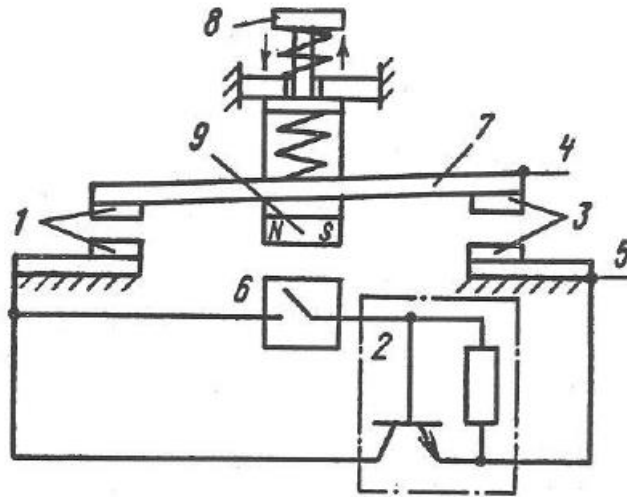


Рисунок 3.9 - Схема керування транзисторним ключем ГА із формуванням сигналу безконтактним датчиком положення якоря:
конструктивна схема ГА із постійним магнітом

У 80-х роках ХХ століття в Україні розпочався один із найінтенсивніших етапів розвитку силової електроніки. Він був зумовлений впровадженням у технологію керованих силових напівпровідникових пристроїв (СНП), а також удосконаленням методів інтегральної електроніки. Це сприяло створенню повністю керованих СНП із характеристиками, які максимально наближалися до «ідеального» ключа. Серед них найбільш поширення отримали потужні біполярні транзистори з ізолюваним затвором (IGBT) та відмикаючі тиристори, зокрема двоопераційні типи GTO, GCT і IGCT (останні мають інтегральний формувач імпульсів керування), а також їх інтегральні модулі.

IGBT представляє собою компромісне рішення, яке поєднує переваги польового керування з властивостями біполярної провідності, утворюючи

транзистор із комбінованою структурою. На сьогоднішній день IGBT є найбільш удосконаленим ключовим елементом комбінованого типу, що серійно виробляється. Їхні діапазони струмів і напруги стрімко зростають, завдяки чому вони практично повністю замінили інші види вимикальних ключів у перетворювальній техніці в діапазоні потужності від кількох до тисяч кВА.

Однак варто відзначити й низку недоліків цих пристроїв, зумовлених їхніми фізичними особливостями. До них належать: значне падіння напруги у відкритому стані, характерне для біполярних ключів; схильність до явища «заціпання», що знижує їхню стійкість до струмів короткого замикання; а також відносно менша швидкодія в порівнянні з аналогами типу МДН (метал-діелектрик-напівпровідник).

Додавання до структури транзистора високолегованого n^+ -шару, відомого як буферний, дозволило значно покращити пробивну напругу та збільшити швидкість перемикавання. Для розширення діапазону робочих струмів IGBT до сотень ампер використовуються модульні конструкції у вигляді півмісткових та місткових конфігурацій.

Станом на кінець 2010-х років активно застосовується вже третє покоління цих транзисторів. Серед найбільш ефективних конструкцій можна виділити модулі серії ECONOPACK від Siemens та USERIES від Mitsubishi Electric [16].

На рис. 3.10 показано графік залежності напруги насичення від часу спаду струму колектору для IGBT-ключів трьох перших поколінь. Цей графік наочно демонструє тенденцію до зменшення залишкової напруги в наступних поколіннях, проте підкреслює, що питання подальшого зниження цієї напруги залишається актуальним.

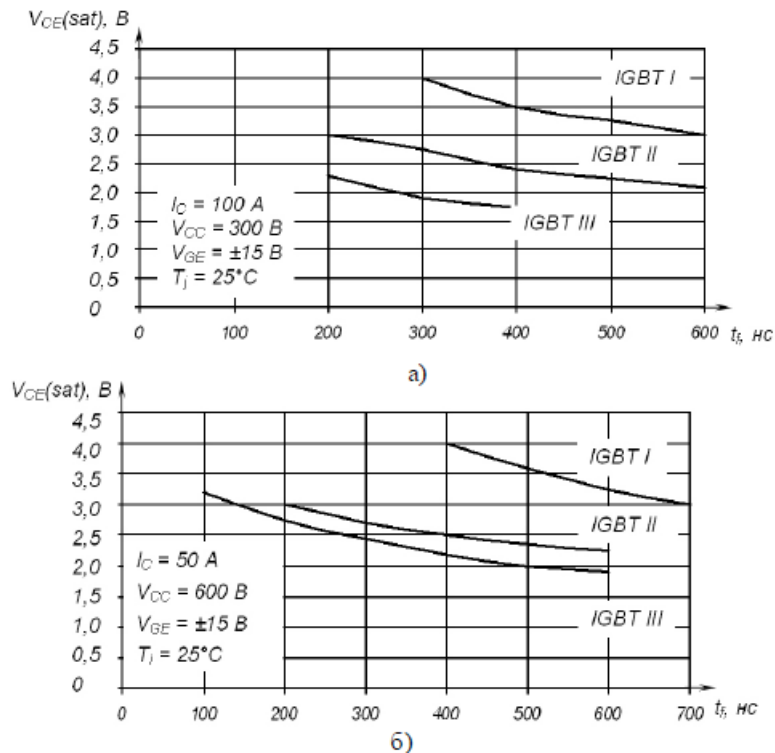


Рисунок 3.10 - Залежність напруги насичення IGBT-ключів різних поколінь від часу спаду колекторного струму: клас напруги 600 В (а); клас напруги 1200 В (б)

Інтенсивний розвиток електроніки, особливо протягом останніх двадцяти років, привів до створення надпотужних як частково, так і повністю керованих напівпровідникових пристроїв, характеристики яких все ближче наближаються до властивостей ідеальних ключів.

На рис. 3.11 представлена загальна діаграма сучасного рівня цих силових напівпровідникових ключів у координатах струмів, напруги та частоти.

Використання сучасних технологій у виробництві та постійне вдосконалення процесів сприяли появі широкого асортименту цих напівпровідникових ключів на світовому ринку силової електроніки. Це забезпечило їх доступність за прийнятною ціною при збереженні високої якості.

Впровадження новітніх напівпровідникових ключів у комутаційні пристрої дозволяє, завдяки використанню інноваційних схемних технічних рішень, зменшити їх вагу, розміри та вартість, підвищити швидкість роботи та стійкість до перевантажень, а також розширити функціональність створюваних удосконалених пристроїв.

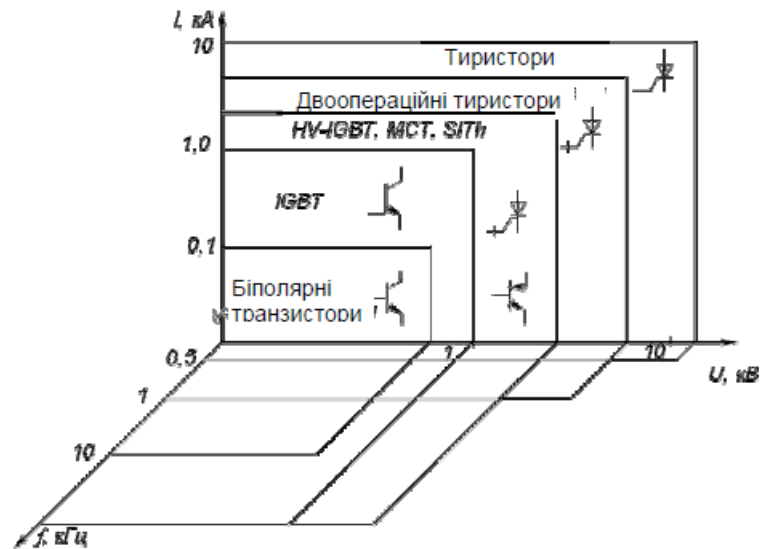


Рисунок 3.11 - Діаграма сучасного рівня розвитку силових напівпровідникових ключів

На рисунках 3.12 та 3.13 наведені сучасні низьковольтні гібридні комутаційні апарати.



Рисунок 3.12 - Вимикач-роз'єднувач-запобіжник

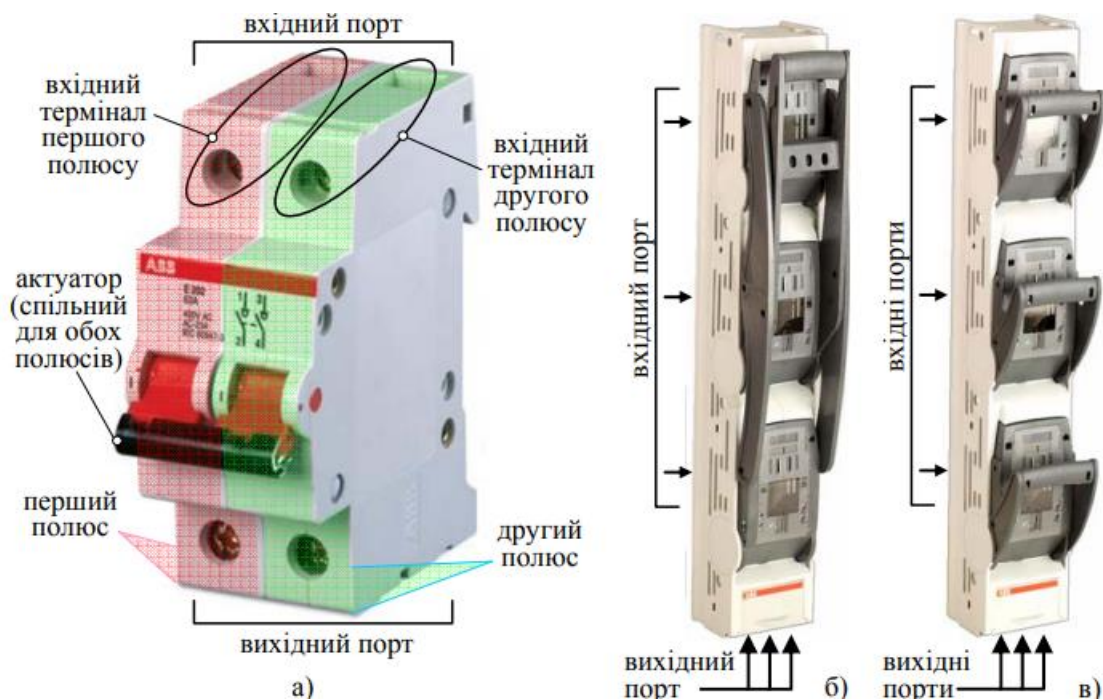


Рисунок 3.13 - Комутаційні апарати з різною кількістю полюсів:

а – двополюсний апарат; б – триполюсний апарат; в – блок з трьох однополюсних апаратів

Таким чином, безконтактні та гібридні комутаційні напівпровідникові апарати формують перспективний клас пристроїв, що активно розвивається у сучасному апаратобудуванні. Їх конкурентоспроможність постійно підвищується завдяки прогресу в галузі силової електроніки та зростаючим вимогам до якості електроенергетичного обладнання з боку сучасних систем електропостачання.

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 3:

Отримані результати дослідження дозволяють створити керований бездуговий гібридний апарат нового покоління, що працює із заданим, близьким до оптимального, законом комутації.

Реалізація оптимального закону бездугової комутації можлива тільки за наявності силового «ідеального комбінованого ключа» і повністю керованого інтелектуального інтегрального гібридного комутаційного апарату.

Створення нового покоління гібридних низьковольтних апаратів з бездуговою комутацією є важливим кроком у підвищенні надійності, ефективності та безпеки електроенергетичних систем. Використання технологій бездугової комутації дозволяє значно знизити рівень зносу контактних елементів, зменшити втрати енергії та забезпечити стійкість роботи обладнання у широкому діапазоні навантажень.

Це відкриває нові можливості для інтеграції розподілених енергоресурсів (DER) у мережу та сприяє розвитку розумних електромереж.

Безконтактні та гібридні комутаційні напівпровідникові апарати формують перспективний клас пристроїв, що активно розвивається у сучасному апаратобудуванні. Їх конкурентоспроможність постійно підвищується завдяки прогресу в галузі силової електроніки та зростаючим вимогам до якості електроенергетичного обладнання з боку сучасних систем електропостачання.

ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ

Зроблена класифікація низьковольтних електричних апаратів з точки зору різних факторів. Наприклад, результати досліджень низьковольтних комутаційних апаратів, що застосовуються в цехових мережах промислового електропостачання показали, що за конструктивними особливостями апарати можна розділити на три групи: апарати, що мають крім силових контактів у силовому ланцюзі додаткові елементи; апарати, що мають відносно великий опір силового ланцюга; апарати, що мають тільки перехідний опір контактів, такі як рубильники.

Оцінка надійності роботи низьковольтних комутаційних апаратів є критично важливою для забезпечення стабільності електричних мереж, особливо в умовах зростання навантаження та інтеграції сучасних технологій. Перехід на гібридну комутаційну систему дозволяє підвищити ефективність роботи цих апаратів, зменшити зношення механічних компонентів і мінімізувати ризик відмов. Це сприяє покращенню експлуатаційних характеристик, зниженню витрат на обслуговування та підвищенню безпеки електропостачання.

Вибір критерію оцінки технічного стану низьковольтних комутаційних апаратів має ключове значення для впровадження та розвитку гібридної комутації. Точна діагностика технічного стану дозволяє ідентифікувати слабкі місця в роботі апаратів і визначити оптимальні умови їх переходу на гібридні технології. Це сприяє підвищенню надійності, ефективності та довговічності комутаційних систем, забезпечуючи їхню адаптацію до сучасних вимог енергетичних мереж. Таким чином, правильний вибір критеріїв оцінки стає основою для інтеграції інноваційних рішень у галузі комутаційної техніки.

У практичному аспекті розглянуто проблеми гібридних НКА у зв'язку з ерозійними процесами, сформульовані завдання та зазначені напрями їх дослідження в умовах без дугової комутації при розмиканні електричних

контактів низьковольтних сильноточних ланцюгів постійного струму, розв'язання яких перебуває у прямому зв'язку зі створенням закону гібридної комутації.

В даний час назріла необхідність створення нового покоління ГА, які працюють із заданим законом без дугової гібридної комутації. З цією метою необхідно поетапно провести науково-дослідні та дослідно-конструкторські роботи в рамках теоретичних та експериментальних досліджень щодо підвищення комутаційної зносостійкості ГА, оптимізації електромеханічної контактної та безконтактної систем, вибору контактних матеріалів з мінімальним електричним зносом та захистом контактів від вібрації.

Отримані результати дослідження дозволяють створити керований бездуговий гібридний апарат нового покоління, що працює із заданим, близьким до оптимального, законом комутації.

Реалізація оптимального закону бездугової комутації можлива тільки за наявності силового «ідеального комбінованого ключа» і повністю керованого інтелектуального інтегрального гібридного комутаційного апарату.

Створення нового покоління гібридних низьковольтних апаратів з бездуговою комутацією є важливим кроком у підвищенні надійності, ефективності та безпеки електроенергетичних систем. Використання технологій бездугової комутації дозволяє значно знизити рівень зносу контактних елементів, зменшити втрати енергії та забезпечити стійкість роботи обладнання у широкому діапазоні навантажень.

Це відкриває нові можливості для інтеграції розподілених енергоресурсів (DER) у мережу та сприяє розвитку розумних електромереж.

Безконтактні та гібридні комутаційні напівпровідникові апарати формують перспективний клас пристроїв, що активно розвивається у сучасному апаратобудуванні. Їх конкурентоспроможність постійно підвищується завдяки прогресу в галузі силової електроніки та зростаючим вимогам до якості електроенергетичного обладнання з боку сучасних систем електропостачання.

СПИСОК ПОСИЛАНЬ

1. Правила улаштування електроустановок (ПУЕ). Огляд базових розділів, 2021. – 617 с.
2. Atmaji A.M.S. Hybrid Switching: A Review of Current Literature / A.M.S. Atmaji, J.G.J. Sloot // IEEE-Proceedings of EMPD, 2018. Vol. 2. P. 683 – 688.
3. Atmaji A.M.S. Direct current hybrid breakers: A design and its realization /Ali M.S. Atmadji. – Eindhoven : Technische Universiteit Eindhoven, 2020. 195 p.
4. Collart P. DC Circuit Hybrid Breaker: the DHR / P. Collart, S. Pellichero // IEEE Colloquium on Electronic – Aided Current – Limiting Circuit Breaker Developments and Applications, feb. 2020.: Digest № 2020/142. C. 29 – 32.
5. Hasan S. The Critical Switching Parameters of a New Hybrid AC Low Voltage Circuit Breaker without and with ZnO Varistor / S. Hasan // 6th Int. Symp. On Short-Circuit Currents in Power Sistem, September 2014, Liege, Belgium, P. 311 – 318.
6. IEC 60050-826: 2014. IEC Chapter 826: Electrical installations. 72 p.
7. IEC 60027-1: Sixth edition, 2022. Corrected and reprinted 2022-03-31. Letter symbols to be used in electrical technology . Part 1: General. – 115 p.
8. IEC 60669-1: Ed. 4.1, 2007-04. Switches for household and similar fixed electrical installations – Part 1: General requirements. – 97 p.
9. IEC 60694: Ed. 2.2, 2022-01. Common specifications for high-voltage switchgear and controlgear standards. 224 p.
10. IEC 62305-1: First edition, 2016-01. Protection against lightning. Part 1: General principles. 136 p.
11. Directive 2022/95/EC of the European Parliament and of the Council of 27 January 2023: On the restriction of the use of certain hazardous substances in electrical and electronic equipment (RoHS directive). <http://www.rohs.eu>

12. Atmaji A.M.S. Hybrid Switching: A Review of Current Literature / A.M.S. Atmaji, J.G.J. Sloop // IEEE-Proceedings of EMPD, 2018. Vol. 2. P.683 – 688.

13. Atmaji A.M.S. Direct current hybrid breakers: A design and its realization /

Ali M.S. Atmadji. Eindhoven : Technische Universiteit Eindhoven, 2020. – 195 p.

14. Collart P. DC Circuit Hybrid Breaker: the DHR / P. Collart, S. Pellichero // IEEE Colloquium on Electronic Aided Current – Limiting Circuit Breaker –Developments and Applications, feb. 2016.: Digest № 1990/142. C. 29 – 32.

15. Hasan S. The Critical Switching Parameters of a New Hybrid AC Low Voltage Circuit Breaker without and with ZnO Varistor / S. Hasan // 6th Int. Symp. On Short-Circuit Currents in Power Sistem, September 2014, Liege, Belgium, P. 311 – 318.

16. Mitlehner, H. Dynamic Characteristics of High Voltage 4H SiC Vertical JFETs / H. Mitlehner, W. Bartsch, K. Dohnke, P. Friedrichs, R. Kaltschmidt // Power Semiconductor Devices and IC's. ISPSD'19. IEEE International Symposium. Toronto, 2019. P. 339–342