

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ПОЛІСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет інженерії та енергетики

Кафедра електрифікації, автоматизації виробництва та інженерної екології

Кваліфікаційна робота
на правах рукопису

Іванченко Іван Андрійович

УДК 621.359.4

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

Дослідження та аналіз процесів при комутації електродвигунів вакуумним
вимикачем
(тема роботи)

141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

(шифр і назва спеціальності)

Подається на здобуття освітнього ступеня бакалавр

кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

Іванченко І.А.

(підпис, ініціали та прізвище здобувача вищої освіти)

Керівник роботи

Журавльов Валерій Пилипович

(прізвище, ім'я, по батькові)

д.ф-м.н., професор кафедри вищої
та прикладної математики

(науковий ступінь, вчене звання)

Житомир – 2025

АНОТАЦІЯ

Іванченко Д.В. Дослідження та аналіз процесів при комутації електродвигунів вакуумним вимикачем. Кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня бакалавра за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка – Поліський національний університет, Житомир, 2025.

Метою даної роботи є визначення рівнів перенапруг, що виникають при комутації високовольтних електродвигунів вакуумними вимикачами та розробка на цій основі ефективних пристроїв захисту, що забезпечують для ізоляції безпечних рівнів перенапруг.

Ключові слова: асинхронний двигун, вакуумний вимикач, математичне моделювання.

ABSTRACT

Ivanchenko D.V. Research and analysis of processes during switching of electric motors by a vacuum switch. Qualification work for obtaining a bachelor's degree in specialty 141 - Electric power, electrical engineering and electromechanics - Polissia National University, Zhytomyr, 2025.

The purpose of this work is to determine the levels of overvoltages that arise during switching of high-voltage electric motors by vacuum switches and to develop on this basis effective protection devices that provide safe levels of overvoltages for isolation.

Keywords: asynchronous motor, vacuum switch, mathematical modeling.

ЗМІСТ

ВСТУП	4
РОЗДІЛ 1. МОДЕЛЮВАННЯ КОМУТАЦІЙНИХ ПЕРЕНАПРУЖЕНЬ ПРИ КОМУТАЦІЇ ВИСОКОВОЛЬТНИХ ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ ВАКУУМНИМИ ВИМИКАЧАМИ	7
1.1. Загальні відомості про сучасні вакуумні вимикачі високої напруги	7
1.2. Моделювання перенапруг при комутації високовольтних електродвигунів вакуумними вимикачами	14
Висновки по розділу 1	22
РОЗДІЛ 2 ДОСЛІДЖЕННЯ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ ПРИ КОМУТАЦІЇ ВАКУУМНИМ ВИМКНЮВАЧЕМ ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ	23
2.1. Вплив електродвигунів на перехідні процеси при їх відключенні	23
2.2. Критерії керованого управління відключенням електродвигуна	29
Висновки по розділу 2	35
ВИСНОВКИ	36
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	38

Вступ

У процесі експлуатації ізоляція високовольтного електрообладнання технологічних установок гірничодобувних підприємств зазнає негативного впливу численних факторів, внаслідок чого відбувається зниження її діелектричної міцності. Це згодом приводить її до частих пошкоджень, тривалих простоїв обладнання та значних економічних збитків.

Одним з таких факторів є внутрішні перенапруги, зокрема, комутаційні перенапруги, оскільки мають значні за величиною амплітуди напруг, що виникають, високу частоту виникнення перенапруг і високу початкову швидкість наростання імпульсу.

Досвід експлуатації показав, що основний обсяг аварійного виходу з ладу електроустаткування пов'язаний із пробоями ізоляції внаслідок дії комутаційних перенапруг (КП).

Проблема захисту ізоляції високовольтного електроустаткування від комутаційних перенапруг набула найбільшої актуальності після впровадження у промислову експлуатацію вакуумної комутаційної апаратури. По-перше, величина перенапруг при відключенні навантаження може досягати значень, що значно перевищують діелектричну міцність ізоляції електроустановки. По-друге, ці апарати впроваджуються в електроустановки з частими комутаціями. По-третє, багаторазові повторні запалювання дуги в камері, що гасить дугогасіння, при несприятливих умовах можуть призвести до виникнення небезпечних за величиною перенапруг.

Ця проблема найбільш актуальна для електроприймачів зі зниженим рівнем міцності ізоляції (двигуни, які тривалий час перебувають в експлуатації або вийшли з капітального ремонту, гнучкі кабелі, трансформатори із сухою ізоляцією). Це насамперед пов'язане з відсутністю надійного захисту від КП для такої категорії електроприймачів.

Аналіз досвіду експлуатації пристроїв з обмеження комутаційних перенапруг показує, що, незважаючи на застосування зазначених пристроїв, аварійність високовольтних електродвигунів зберігається на досить високому

рівні. Це пояснюється тим, що в даний час експлуатуються електроприймачі з терміном служби 10 років і більше, рівень міцності ізоляції яких нижчий за рівень обмеження перенапруг захисними пристроями. Тому проблема обмеження КІ зберегла свою актуальність у наш час.

Метою кваліфікаційної роботи є: визначення рівнів перенапруг, що виникають при комутації високовольних електродвигунів вакуумними вимикачами та розробка на цій основі ефективних пристроїв захисту, що забезпечують для ізоляції безпечних рівнів перенапруг.

Під час написання кваліфікаційної роботи було розглянуто: методика моделювання перенапруг, що ініціюються вакуумною комутаційною апаратурою при комутації високовольного електроустаткування, що дозволяє проводити теоретичні дослідження з широкою варіацією початкових умов перехідного процесу; рівні перенапруг в залежності від параметрів системи електропостачання електродвигуна, потужності навантаження, величини струму зрізу та повторних запалювань дуги у вакуумному вимикачі; методика визначення оптимальних параметрів захисних пристроїв, що дозволяє підвищити ефективність захисту від перенапруг електроустаткування зі знизеним рівнем діелектричної міцності ізоляції; пристрої обмеження перенапруг, що забезпечують надійний захист високовольного електроустаткування пересувних та стаціонарних електроприймачів на гірничодобувних підприємствах.

Достовірність результатів роботи забезпечується: підтвердженням результатів теоретичних досліджень результатами експериментальних досліджень з використанням сучасної обчислювальної техніки та пакету прикладного математичного та загальноматематичного програмного забезпечення "MATCHAD2001" "MICROSOFT EXEL".

Новизною роботи є: запропоновано математичну модель процесу відключення електричної машини, що обертається, вакуумними вимикачами; встановлені залежності комутаційних перенапруг від параметрів схеми електропостачання електродвигуна, величини та знаку струму зрізу,

повторних запалювань дуги; визначені оптимальні параметри захисних пристроїв, які дозволяють підвищити ефективність захисту ізоляції електроприймачів від комутаційних перенапруг.

Практична цінність роботи: застосування методики визначення параметрів пристроїв обмеження КП дозволяє підвищити їхню ефективність, що призводить до зниження негативного впливу КП на ізоляцію. Це, у свою чергу, призводить до скорочення обсягу аварійного виходу з ладу електричних машин, до істотного зниження економічної шкоди, пов'язаної з простоєм технологічного обладнання.

Перелік публікацій автора за темою дослідження :

Іванченко І.А., СХЕМА ЗАМІЩЕННЯ ДІЛЯНКИ ЕЛЕКТРИЧНОЇ МЕРЕЖІ ДЛЯ МОДЕЛЮВАННЯ ПЕРЕНАПРУГ ПРИ КОМУТАЦІЇ ВИСОКОВОЛЬТНИХ ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ ВАКУУМНИМИ ВИМИКАЧАМИ

Матеріали науково-практичної конференції науково-педагогічних працівників, докторантів, аспірантів та здобувачів вищої освіти факультету інженерії та енергетики «СТУДЕНТСЬКІ ЧИТАННЯ – 2025» 31 жовтня 2024 року. Житомир: Поліський національний університет, 2024.- С 151-153.

Журавльов В.П., Іванченко І.А. ВПЛИВ ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ НА ПЕРЕХІДНІ ПРОЦЕСИ ПРИ ЇХ ВІДКЛЮЧЕНІ

Наукові читання – 2025: збірник тез доповідей науково-практичної конференції за підсумками І-го туру Всеукраїнського конкурсу студентських наукових робіт з галузей знань і спеціальностей. 23 квітня 2025 р. Житомир: Поліський національний університет, 2025. – С 140-142.

РОЗДІЛ 1

МОДЕЛЮВАННЯ КОМУТАЦІЙНИХ ПЕРЕНАПРУЖЕНЬ ПРИ КОМУТАЦІЇ ВИСОКОВОЛЬТНИХ ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ ВАКУУМНИМИ ВИМИКАЧАМИ

В електричних мережах 6 (10) кВ переважно використовуються вакуумні вимикачі, що мають ряд експлуатаційних переваг [1, 2]. Однак, поряд з цим у вакуумних апаратів є істотний недолік, пов'язаний з комутаціями індуктивних навантажень. Комутації такими апаратами можуть ініціювати багаторазові повторні запалюваннями (ПЗ) дуги і, відповідно, високочастотні перенапруги, що становить небезпеку для ізоляції електрообладнання, особливо електродвигунів і кабелів зі зшитого поліетилену, що мають найменший запас електричної міцності [9].

1.1. Загальні відомості про сучасні вакуумні вимикачі високої напруги

Розглянемо варіанти конструктивного виконання сучасних вакуумних високовольтних вимикачів, а також осцилограми відключення змінного струму у вакуумі та пристрій вакуумних дугогасних камер (ВДК) з поперечним та поздовжнім магнітним полем.

Для створення надійно працюючих вакуумних дугогасних камер, здатних відключати великі струми при високій напрузі електричної мережі, потрібно виконати велику програму досліджень.

Перехід від одиничних дослідних зразків вакуумних вимикачів до їх серійного промислового виробництва зайняв досить великий проміжок часу, оскільки зажадав проведення додаткових інтенсивних досліджень і розробок, спрямованих на відшукування ефективного способу запобігання небезпечних комутаційних перенапруг, що виникали з-за передчасного обриву струму. Були вирішені складні проблеми, пов'язані з розподілом напруги та забрудненням внутрішніх поверхонь ізоляційних деталей парами металу, що осаджувалися на них, проблеми екранування та створення нових високонадійних сильфонів та ін.

Слід відмітити, що електрична міцність вакууму (10^{-6} мм. рт. ст.) значно вища за міцність інших середовищ, що застосовуються у вимикачах. Пояснюється це збільшенням довжини середнього вільного пробігу електронів, атомів, іонів та молекул у міру зменшення тиску. У вакуумі довжина вільного пробігу частинок перевищує розміри вакуумної камери. У цих умовах удари частинок об стінки камери відбуваються значно частіше, ніж зіткнення між частинками. При високій електричній міцності вакууму (~ 30 кВ/мм) відстань між контактами може бути дуже малою, тому розміри дугогасної камери можуть бути відносно невеликими. Процес відновлення електричної міцності проміжку між контактами при відключенні струму протікає у вакуумі значно швидше, ніж у газах.

Для надійності роботи вакуумного вимикача та збільшення терміну його служби дуже важливу роль відіграє зносостійкість контактів, що розпорошуються під час горіння дуги. Метали, які використовуються для контактів, повинні мати механічну міцністю, високу провідність, стійкість щодо ерозії та зварювання.

Гасіння дуги змінного струму здійснюється при розведенні контактів у глибокому вакуумі (залишковий тиск близько 10^{-6} мм. рт. ст.).

У момент часу t_1 (рис. 1.1) починається розбіжність контактів вакуумної дугогасної камери та в міжконтактному проміжку запалюється електрична дуга. Падіння напруги на дузі надзвичайно мале і зазвичай не перевищує 30 В.

У момент t_2 переходу струму через природний нуль міжконтактний проміжок заповнений іонізованими парами металу, що утворилися протягом горіння дуги t_1 - t_2 . Однак, через відсутність середовища, що перешкоджає розльоту цих парів, їх відхід із проміжку здійснюється за надзвичайно короткий час $\sim 10^{-5}$ с, після чого вакуумний вимикач готовий витримати напругу, що відновлюється.

Оскільки електрична міцність вакуумного проміжку надзвичайно висока, відключення гарантовано відбувається при зазорах понад 1 мм.

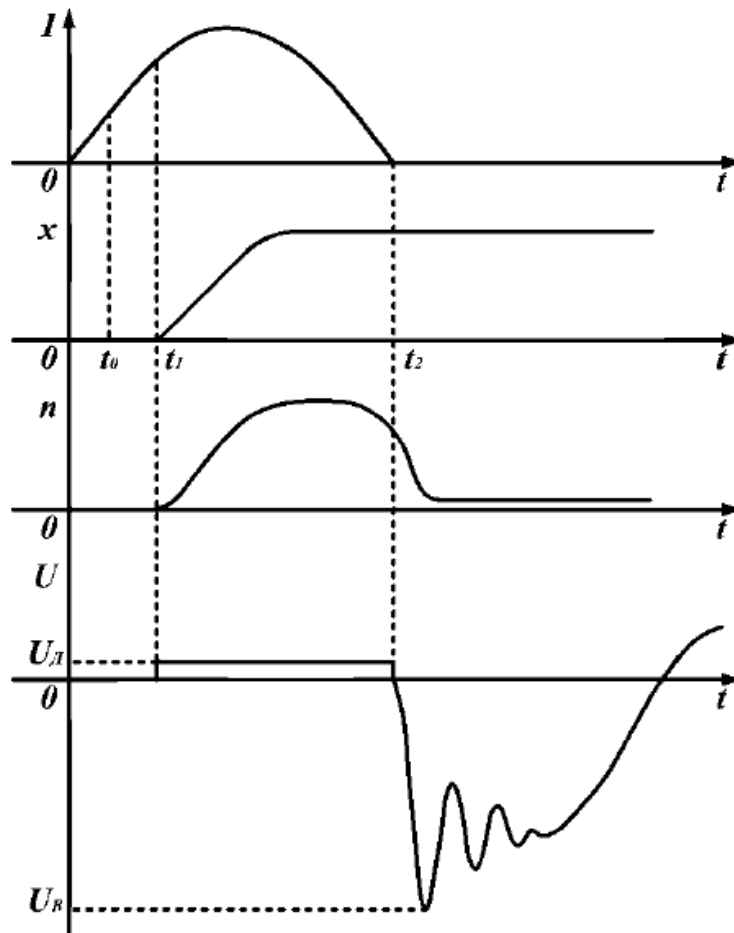


Рисунок 1.1. Осцилограми відключення змінного струму у вакуумі

В останні роки відзначається інтенсивне використання вакуумних комутаторів в області напруги 6-35 кВ для створення вакуумних контакторів, вимикачів навантаження, вакуумних вимикачів для комплектних розподільчих пристроїв (КРУ). Це пояснюється низкою безперечних переваг: висока швидкодія, повна вибухо- та пожежна безпека, екологічна чистота, широкий діапазон температури (від +200 до -70 °С) надійність, мінімальні експлуатаційні витрати, мінімальні габаритні розміри, підвищена стійкість до ударних та вібраційних навантажень, висока зносостійкість при комутації номінальних струмів і струмів навантаження, довільне робоче положення вакуумного дугогасителя.

Принцип використання вакууму для гасіння дуги при високих напругах відомий досить давно. Але практична реалізація стала можлива лише після появи технічних можливостей - створення вакуумночистих провідникових та

ізоляційних матеріалів великих розмірів, проведення вакуумночистих зборок цих матеріалів та отримання високого вакууму до $1,3 \cdot 10^{-2}$ - 10^{-5} Па.

Умови існування та гасіння дуги у вакуумі мають свої особливості. При розбіжності контактів у вакуумної дугогасної камери (ВДК) в останній момент між ними утворюється рідкометалевий місток, який потім руйнується. Відбувається іонізація парів металу контактного містка під впливом прикладеної напруги мережі, що призводить до утворення дуги. Таким чином, дуга у вакуумі існує через іонізацію парів контактного матеріалу спочатку за рахунок матеріалу контактного містка, а потім у результаті випаровування матеріалу електродів під впливом енергії дуги. Тому, якщо надходження парів контактного матеріалу буде недостатньо, вакуумна дуга має згаснути. При підході струму до нуля теплова енергія, що виділяється в дузі, також зменшується, кількість парів металу відповідно знижується і луги повинні згаснути на першому переході струму через нуль. Час горіння дуги у ВДК вбирається у 10 мс. Крім того, для вакуумної дуги характерна дуже висока швидкість деіонізації стовпа дуги (дифузна деіонізація носіїв струму електронів та іонів), що забезпечує швидке відновлення електричної міцності після згасання дуги.

У вакуумі електрична дуга існує або в розсіяному дифузному вигляді при струмах до 5000-7000 А, або в концентрованому стисненому вигляді при великих значеннях струму. Граничний струм переходу дуги з одного стану в інший залежить значною мірою від матеріалу, геометричної форми та розмірів контактів, а також від швидкості зміни струму. «Дифузна» дуга у вакуумі існує у вигляді кількох паралельних дуг одночасно, через кожну з яких може протікати струм від кількох десятків до кількох сотень ампер. При цьому катодні плями, відштовхуючись одна від одної, прагнуть охопити всю контактну поверхню. При невеликих струмах на значній площі контактів сили електромагнітної взаємодії цих провідників зі струмом (струми одного напрямку притягуються) не можуть подолати сил відштовхування катодних плям один від одного. Так як через кожну пляму протікають невеликі струми,

це призводить до невеликих розмірів опорних плям дуги на катоді і відповідно теплова постійна їх виявляється дуже малою $\tau_{\text{диф}} < 1 \text{ мкс}$.

У міру збільшення струму сили електромагнітного тяжіння долають сили відштовхування і відбувається злиття окремих дуг в один канал, що призводить до різкого збільшення розмірів катодної опорної плями і відповідно його теплової постійної напруги. Тому завдання, які стоять розробки ВДК, полягають у створенні умов, за яких дуга існувала б у «дифузному» вигляді, або час впливу «стиснутої» дуги на електроди було б мінімальним. Це досягається створенням радіальних магнітних полів, що забезпечують переміщення опорних точок дуги з високою швидкістю по електродах.

Для отримання радіальних та аксіальних магнітних полів розроблено різні конструкції контактних систем. У ВДК на номінальну напругу 10 кВ та номінальні струми відключення до 31,5 А застосовуються контактні системи з поперечним (стосовно дуги) радіальним магнітним полем (рис. 1. 2). Контакти зі спіральними пелюстками мають вигляд дисків, які мають периферійні ділянки розрізані спіральними пазами 3 на сегменти, з'єднані у центральній частині. У замкнутому стані контакти стикаються по кільцевому виступу 1. При розмиканні контактів дуга під впливом електродинамічних сил, що виникають через викривлення контуру струму, переміщується на периферійні ділянки 4. При цьому через спіралеподібних прорізів виникає радіальне магнітне поле, під впливом якого не викликає появи більших розплавлених зон на електродах. Зі збільшенням струму до 50 кА при обмеженості геометричних розмірів електродів швидкості руху дуг стають настільки великі, що дуга все-таки встигає утворити значні оплавлення особливо гострих кромek пелюсток. Це і обмежило межу відключає можливості контактних систем такого типу до 50 кА.

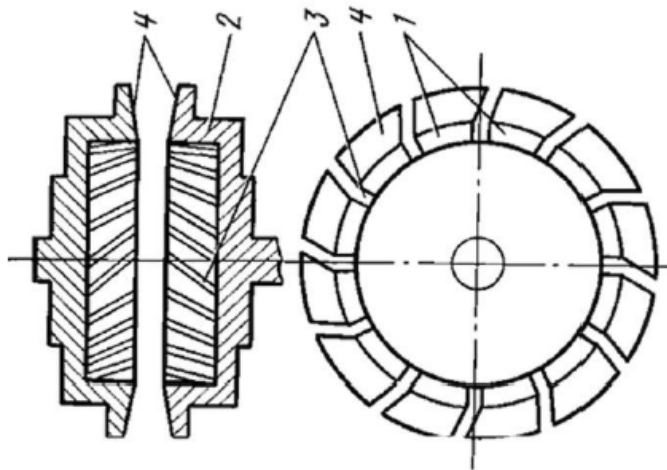


Рисунок 1.2. Конструкція контактної системи ВДК із поперечним магнітним полем

Нові розробки контактних систем спрямовані на створення аксіального (поздовжнього по відношенню до дуги) магнітного поля, утвореного струмом відключення.

Існує безліч різних конструкцій вакуумних дугогасних камер. Одна з поширених конструкцій (рис. 1.3) має два ізоляційних циліндричних кожуха 1, 2, забезпечених але торцям металевими фланцями 4, 15. Нерухомий контакт 12 за допомогою струмовводу 13 жорстко кріпиться до фланця 15, рухомий контакт 11 пов'язаний з фланцем 4 за допомогою сильфона 5. Як правило, в конструкції ВДК є екрани 3, 9, 10, 14, що виконують функції підвищення електричної міцності, електричних полів та захисту внутрішніх ізоляційних частин від металізації розпиленним контактним матеріалом. Електрична міцність контактної проміжки у ВДК дуже висока. Це призводить до того, що відстань між контактами при напругах до 35 кВ не перевищує 5 мм. Незважаючи на те, що сильфоном створюються певні зусилля на контакт, загальне контактне зусилля з урахуванням струмів КЗ 40-100 кА у ВДК може досягати 1000-4000 Н [7].

Вакуумні вимикачі знаходять все ширше застосування, часто замінюючи і витісняючи менш надійні і більш метало- та матеріаломісткі масляні та електромагнітні вимикачі.

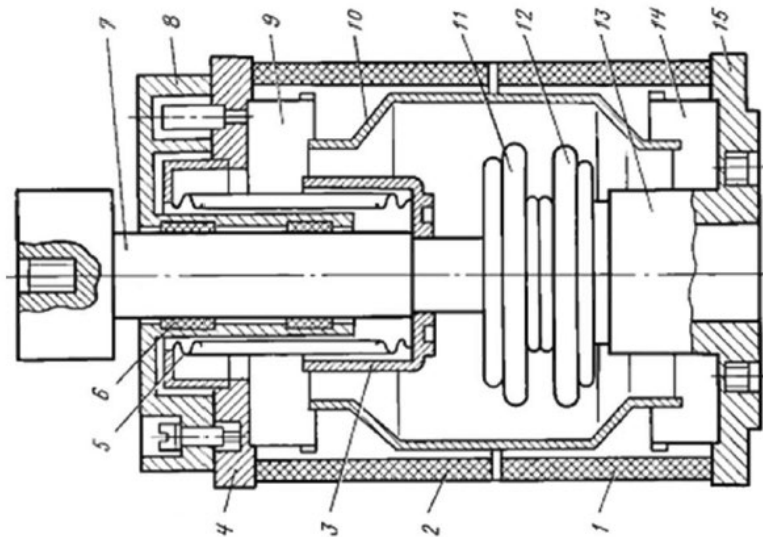


Рисунок 1.3. Вакуумна дугогасительна камера ВДК-10-31

В даний час в світі налагоджено промисловий випуск високонадійних швидкодіючих вакуумних вимикачів, здатних відключати великі струми в електричних мережах середньої (6, 10, 35 кВ) та високої напруги (до 110 кВ включно). Приклад конструктивного виконання вакуумного вимикача високої напруги наведено на рис. 1.4.



Рисунок 1.4. Вакуумний вимикач високої напруги

1.2 Моделювання перенапруг при комутації високовольтних електродвигунів вакуумними вимикачами

Одним з головних досягнень у галузі розвитку комутаційної апаратури стала розробка та широке впровадження вимикачів у промислове

виробництво, в яких як дугогасне середовище застосовувалася шестифториста сірка SF_6 (елегаз) або вакуум. При цьому елегазові вимикачі знайшли застосування в основному в електричних мережах напругою 110 кВ і вище, а вакуумні – в електроустановках напруга 6–35 кВ.

Підприємства гірничої промисловості стали одними з перших, де було розпочато широке застосування вакуумних вимикачів як у нашій країні, так і за кордоном. Це пояснюється тим, що у важких умовах експлуатації на гірничих підприємствах відчутно виявляються переваги вакуумних вимикачів перед іншими типами комутаційної апаратури, а саме: висока експлуатаційна надійність і комутаційна зносостійкість, підвищена стійкість до динамічних навантажень, повна пожежо- та вибухобезпечність, широке середовище [1,2].

У той же час широке впровадження вакуумних вимикачів у нафтову, металургійну та гірничодобувну промисловість призвело до загострення проблеми комутаційних перенапруг створюваними цими апаратами. За певних поєднань початкових умов комутації вакуумні вимикачі можуть створювати небезпечні для ізоляції електроустаткування перенапруги. Ця проблема особливо проявляється для елементів мережі з досить низьким рівнем міцності ізоляції: високовольтні електродвигуни та гнучкі кабелі з гумовою ізоляцією [2].

Розв'язання задачі щодо зниження негативного впливу комутаційних перенапруг на ізоляцію електрообладнання вимагає проведення складних і дорогих експериментів на технологічному обладнанні підприємств з використанням вимірювальної апаратури, яка серійно не випускається. У зв'язку з цим важливе практичне значення набуває математичне моделювання комутаційних перенапруг, так як воно дозволяє виключити дорогі експериментальні дослідження. Розмір комутаційних перенапруг залежить від багатьох чинників, саме: потужність і тип навантаження; величина та полярність струму зрізу; величина хвильового опору; синхронність замикання або розмикання полюсів контактів високовольтного вимикача; тип комутаційного апарату; відключаючу здатність по високочастотному струму;

повторні запалення дуги; якості ремонту обмотки статора. Багато з цих факторів носять випадковий характер і діють у найрізноманітніших поєднаннях. Облік всіх цих факторів при аналітичному дослідженні комутаційних перенапруг є важкоздійсненним завданням. Тому важливим моментом при аналітичних дослідженнях є адекватність схеми заміщення ділянки електричного ланцюга «вакуумний вимикач – кабель – електродвигун» високочастотного імпульсного перехідного процесу (рис.1.5). Для моделювання пропонується однофазна схема заміщення за умови симетричності фаз навантаження (рис. 1.6).

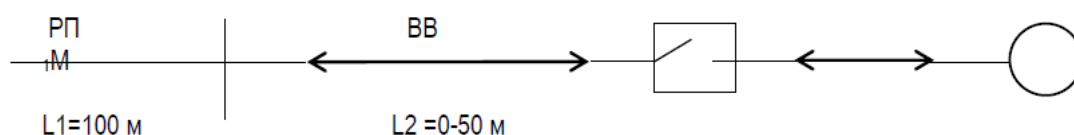


Рисунок 1.5. Ділянка електричної мережі «розподільний пункт – кабель (L1) – вакуумний вимикач – кабель (L2) – високовольтний вимикач – двигун М»

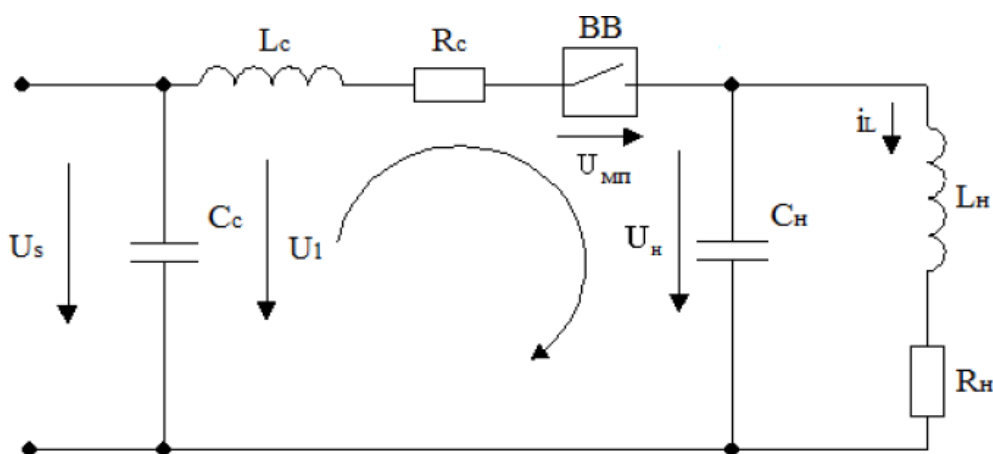


Рисунок 1.6. Схема заміщення ділянки електричної мережі «розподільний пункт – кабель (L1) – вакуумний вимикач – кабель (L2) – високовольтний вимикач – двигун М»: C_c – ємність кабелю щодо землі від РП до вакуумного вимикача; C_n – ємність ділянки мережі, що відключається; L_c , L_n – індуктивності кабелю першої ділянки та навантаження; R_n – активний опір навантаження; R_c – активний опір кабелю від розподільного пункту до вакуумного вимикача; ВВ – вакуумний вимикач; U_s – напруга мережі; $U_{мп}$ –

напруга у міжконтактному проміжку вимикача; U_H – напруга контуру, що відключається.

При математичному описі перехідних процесів приймаємо ряд припущень: міжфазну ємність не враховуємо через її незначність – 10% від ємності фази на землю [3]; міжвитковою ємністю нехтуємо, тому що вона враховується для електродвигунів малої потужності;

обмотка електричної машини є лінійним ланцюгом, параметри якого не залежать від величини струму та напруги; у діапазоні частот 5-25 кГц індуктивність обмотки залишається практично постійною і визначається надперехідним індуктивним опором;

значення напруги мережі при частоті мережі 50 Гц вважаємо квазіпостійною величиною, що дорівнює миттєвому значенню напруги в початковий момент перехідного процесу;

ротор двигуна у момент комутації є нерухомим;

втрати в сталі та діелектричні втрати в корпусній ізоляції електродвигуна не враховуємо, так як виконані розрахунки показали, що вони становлять менше 1–3 % від номінальної потужності електричної машини.

Якщо після згасання дуги не виникне повторне запалювання, то схема заміщення на рис. 1.6 набуде вигляду, представленого на рисунку 1.7. Система рівнянь, що описує фізичні процеси, що протікають у цій схемі, має такий вигляд:

$$\left\{ \begin{array}{l} u_L + u_R + u_H = 0 \\ u_R = i_H \cdot R_H \\ u_L = L_H \cdot \left(\frac{di_H}{dt} \right) \\ i_H = i_C \\ i_H = C_H \cdot \left(\frac{du_H}{dt} \right) \end{array} \right. \quad (1.1)$$

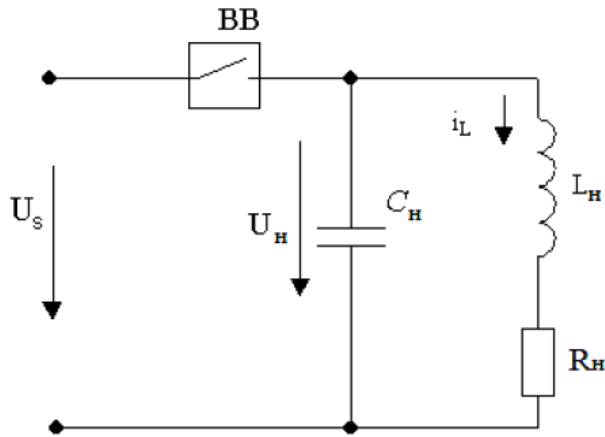


Рисунок 1.7. Схема заміщення без урахування повторних запалювань дуги

З системи рівнянь визначаємо вирази для напруги на навантаженні:

$$i_L = -L_n \cdot C_n \cdot \left(\frac{d^2 i_L}{dt^2} \right) - R_n \cdot C_n \cdot \left(\frac{di_L}{dt} \right), \quad (1.2)$$

$$L_n \cdot C_n \cdot \left(\frac{d^2 U}{dt^2} \right) + R_n + C_n \cdot \left(\frac{dU_n}{dt} \right) + U_n = 0 \quad (1.3)$$

Замінюючі $\frac{dU_n}{dt}$ та $\frac{di_L}{dt}$, одержуємо характеристичне рівняння:

$$\text{для струму} \quad p^2 \cdot L_n \cdot C_n + p \cdot R_n \cdot C_n + 1 = 0 \quad (1.4)$$

$$\text{для напруги} \quad L_n \cdot C_n \cdot p^2 + R_n \cdot C_n \cdot p + 1 = 0 \quad (1.5)$$

Коріння характеристичних рівнянь є комплексними.

Розв'язанням даних характеристичних рівнянь з урахуванням виду коренів будуть такі вирази:

$$i_L(t) = e^{\alpha t} \cdot \left[\left\{ \frac{u_n(0) - i_L(0) - \alpha \cdot L_{50} \cdot i_L(0)}{\omega L_{50}} \right\} \sin(\omega_e t) + i_L(0) \cdot \cos(\omega_e t) \right], \quad (1.6)$$

$$u_n(t) = e^{\alpha t} \cdot \left\{ \left[-\frac{i_{cp}}{C_n \omega_e} - \alpha \cdot u_n(0) \cdot C_n \right] \cdot \sin(\omega_e t) + u_n \cdot \cos(\omega_e t) \right\}, \quad (1.7)$$

де i_{cp} - струм відвантаження навантаження в момент передчасного згасання дуги (струм зрізу).

На рисунках 1.8–1.9 наведено графіки, що зображують залежність перенапруг від довжини кабелю та величини струму зрізу при відключенні синхронного двигуна потужністю 520 кВт як холостого ходу.

Результати моделювання наведено у таблицях 1.1–1.2.

Таблиця 1.1- Залежність коефіцієнта перенапруг від полярності струму зрізу

Потужність електродвигуна	520 кВт		1250 кВт	
Струм зрізу, А	5,7/-5,7	14,1	5,7/-5,7	14,1
Ун.св, кВ	9,0/10,0*	21	7,09/7,35*	13,49
$\kappa_n = \frac{U_{н.св.}}{U_{\Phi}}$	1,83/2,06*	4,29	1,45/1,5*	2,76

*Значення при від'ємній полярності струму зрізу.

Таблиця 1.2 - Залежність коефіцієнта перенапруг від довжини кабельної вставки

Потужність електродвигуна	520 кВт			1250 кВт		
Довжина кабеля, м	0	15	50	0	50	100
Ун.св, В	8968	6028	5500	6813	5839	5469
$\kappa_n = \frac{U_{н.св.}}{U_{\Phi}}$	1,83	1,23	1,12	1,39	1,19	1,0

З рисунків 1.8–1.11 видно, що довжина кабелю між вакуумним вимикачем та електродвигуном надає сильний вплив на амплітуду напруги, що відновлюється, на навантаженні. Зі збільшенням довжини кабельної вставки максимальне значення напруги зменшується (див. рис. 1.8).

Це пояснюється зростанням еквівалентної ємності навантаження, що призводить до зниження хвильового опору відключається контуру.

Зі збільшенням струму зрізу з 5,7 до 14,1 А різко зростає максимальна амплітуда напруги (див. рис. 1.9). Час переходного процесу зростає. Додатковий приріст часу обумовлений великою електромагнітною енергією в індуктивності розсіювання двигуна.

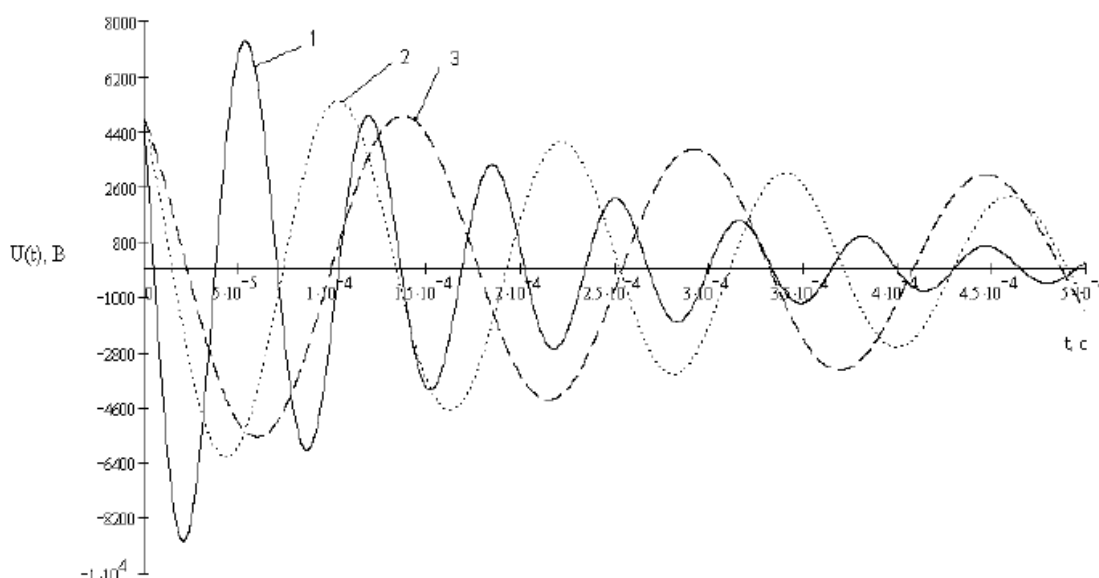


Рисунок 1.8. Залежність величини комутаційних перенапруг від довжини кабельної вставки: 1 – 0 м; 2 – 50 м; 3 – 100 м. Вимкнення синхронного двигуна потужністю 520 кВт на холостому ході. Струм зрізу 5,7 А

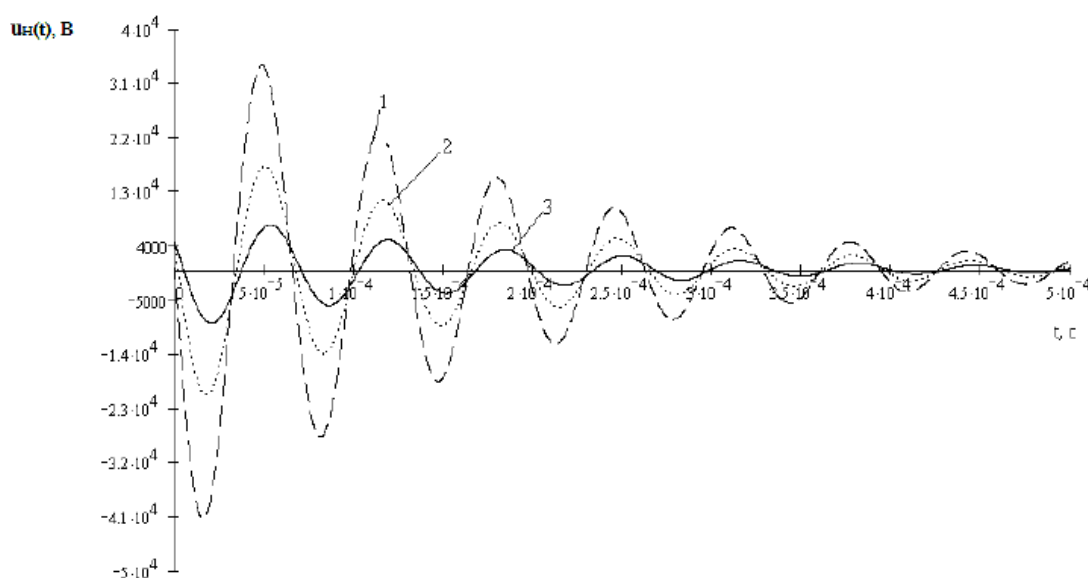


Рисунок 1.9. Залежність величини комутаційних перенапруг від величини струму зрізу: 1 – 5,7 А; 2 – 14 А; 3 – 28 А. Вимкнення синхронного двигуна потужністю 520 кВт без навантаження. Довжина кабельної вставки $L_2=0$ м.

На рисунку 1.10 показані коливання напруги на навантаженні у двох випадках. У першому випадку, якщо струм обірвався на спаді позитивної синусоїди струму, величина очікуваного перенапруги на ємності дорівнює 9 кВ. У другому випадку дуга гасне після переходу струму через нуль (негативна

синусоїда струму). Напруга на ємності навантаження в цей момент часу дорівнює 10 кВ.

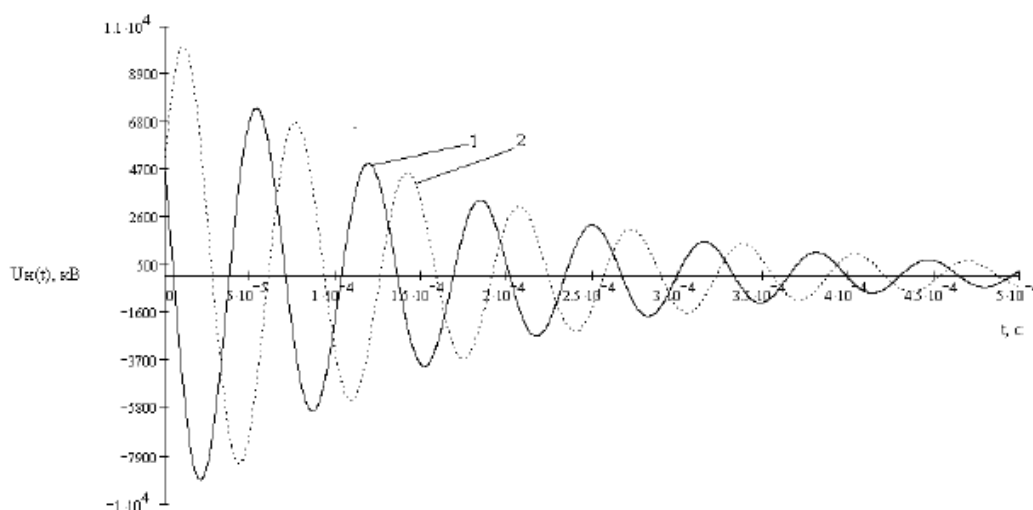


Рисунок 1.10. Залежність величини комутаційних перенапруг від полярності струму зрізу: відключення електродвигуна потужністю 520 кВт на холостому ході. Довжина кабельної вставки: 0 м; 1 – позитивна полярність струму (5,7 А); 2 - негативна полярність струму зрізу (- 5,7 А)

З порівняння перехідних процесів двигунів видно, що зі зростанням потужності електричної машини відбувається зниження рівня виникаючих перенапруг (див. рис. 1.8, 1.11). Однак із збільшенням довжини кабелю рівні очікуваних перенапруг двигунів стають практично однаковими. Час перебігу перехідного процесу відключення значно зростає, так як активний опір обмоток великих двигунів значно менше: $R = 232$ і $R = 6,4$ Ом для двигунів потужністю 520 і 1250 кВт, відповідно, при довжині кабельної вставки, що дорівнює 0 м.

Електрична міцність ізоляції електродвигунів визначається амплітудним значенням випробувальної напруги. Величина випробувальної напруги залежить від коефіцієнта імпульсу $K_{\text{імп}} = U_{\text{імп.пр}}/U_{50}$ ($U_{\text{імп.пр}}$ - амплітуда пробивної напруги; U_{50} - пробивна напруга промислової частоти). У процесі експлуатації електродвигуна відбувається зниження значення даного коефіцієнта до 0,8-1,0 [4]. При $K_{\text{імп}}=0,8$ для мереж напругою 6 кВ імпульсна пробивна імпульсна напруга буде дорівнює $U_{\text{імп.пр}}=K_{\text{імп}} \cdot 1,7 \cdot 1,4 \cdot U_n = 11,58$ кВ.

Отримане значення пробивної напруги є мінімальним значенням, що характеризує електричну міцність ослаблених елементів ізоляційних конструкцій електродвигунів. Отримані в результаті математичного моделювання значення перенапруг у ряді випадків перевищують імпульсну міцність ізоляції електричних машин, що може призвести до аварійного виходу з ладу технологічної установки. Тому зниження рівня перенапруг необхідним застосування спеціальних захисних пристроїв: нелінійних обмежувачів перенапруг ОПН- чи RC-обмежувачів.

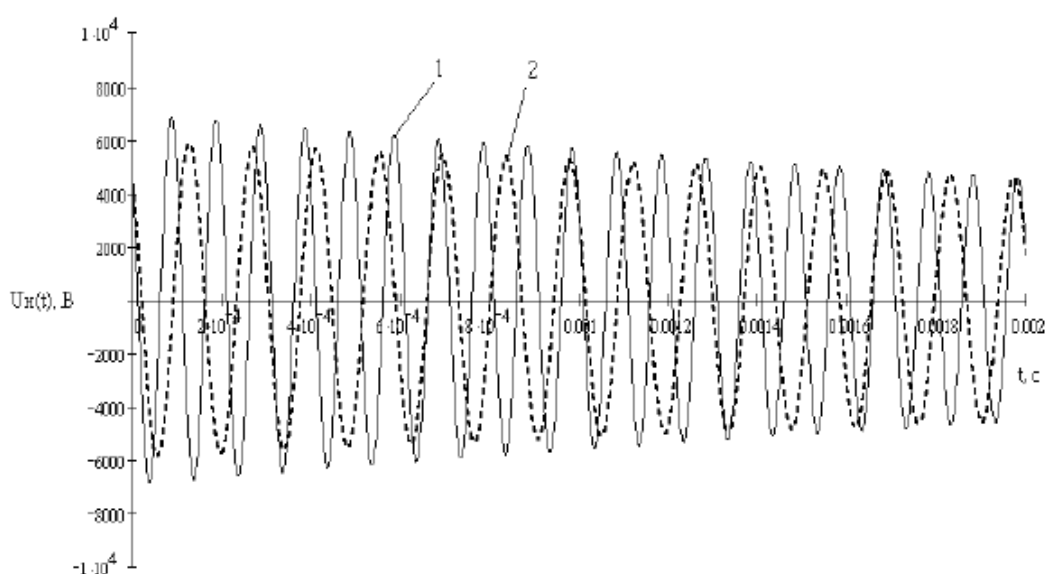


Рисунок 1.11. Залежність величини комутаційних перенапруг від довжини кабельної вставки: відключення електродвигуна потужністю 1250 кВт на холостому ході. Струм зрізу 5,7 А; 1 – довжина кабельної вставки 0 м; 2 – Довжина кабельної вставки 50 м

Висновки по першому розділу

Високовольтні вимикачі високої напруги з гасінням електричної дуги у вакуумі є перспективним класом електричних комутаційних апаратів. Широке їх застосування в системах електроенергетики дозволяє вирішити багато проблем, пов'язаних як з надійністю передачі енергопотоків, так і з вимогами електробезпеки при обслуговуванні та ремонті.

РОЗДІЛ 2

ДОСЛІДЖЕННЯ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ ПРИ КОМУТАЦІЇ ВАКУУМНИМ ВИМКНЮВАЧЕМ ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ

2.1 Вплив електродвигунів на перехідні процеси при їх відключенні

При відключенні електродвигунів основний вплив на рівень перенапруження надають: потужність і режим роботи двигуна, довжина лінії електропередачі і момент комутації апарату. Відключення навантаженого і ненавантаженого електродвигуна дає зазвичай перенапруги трохи більше $2,7 \cdot U_{\text{фм}}$ у разі виникнення ПЗ дуги [2, 3]. Відключення електродвигуна в режимі пуску призводить до більш небезпечних значень, при виникненні віртуальних зрізів струму до $5 U_{\text{фм}}$ і більше [6, 7, 9]. При включенні рухового навантаження великий вплив на перехідний процес мають характеристики вимикача [8, 10]: неодноразовість у роботі полюсів апарату і швидкість зниження електричної міцності при зближенні контактів. За теоретичним відомостями, найбільша величина перенапруг досягає $3 U_{\text{фм}}$ [7]. За експериментальними даними [7, 8, 10], рівень перенапруг доходить до $2,7 U_{\text{фм}}$.

В даний час відсутні ефективні засоби обмеження високочастотних перенапруг. Розрядники, обмежувачі перенапруження, іскрові проміжки не впливають на частоту діючої напруги. RC-ланцюги вимагають точного моделювання для правильного вибору параметрів у кожному окремому випадку [5, 6, 9]. Крім того, наявні засоби зниження впливів перехідного процесу не вирішують першопричину утворення перенапруг, оскільки комутація електричної мережі проводиться в довільний момент часу, а значить, може статися в найгіршій фазі напруги.

Управління моментом включення або відключення мережі дозволить виключити несприятливі умови комутації і з цієї точки зору є принципово новим підходом у зниженні рівнів перенапруги та кидків струму, збільшенні комутаційного ресурсу вимикачів. Керована (або синхронна) комутація являє собою різночасне перемикання полюсів вимикача в строго певний момент

часу в найбільш підходящих для обладнання умовах [7]. Таким чином, метою роботи є дослідження перехідних процесів в електричній мережі 6 (10) кВ при різночасному включенні та відключенні фаз електродвигуна вакуумним вимикачем і визначення найкращих для обладнання умов керованої комутації.

Для дослідження процесів комутації вакуумними вимикачами індуктивного навантаження розглянемо модель електричної мережі 6 (10) кВ, яка представлена на рис. 2.1. У моделі реалізовано незалежне управління моментів включення та відключення полюсів вакуумного вимикача. Модель розроблена з використанням стандартних блоків MatLab/Simulink [8].

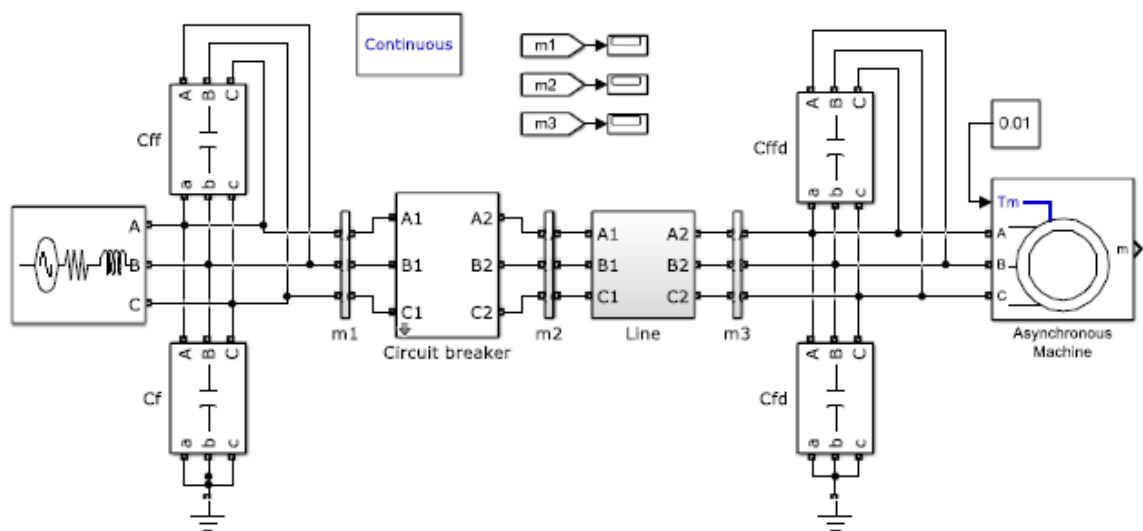


Рисунок 2.1. Модель електричної мережі

Моделювання джерела живлення виконано блоком *Three-Phase Source*. Джерело живлення імітує точку підключення до енергосистеми із заданими параметрами у вигляді внутрішнього опору і має ізольовану нейтраль.

В основі дослідження комутаційних процесів лежить розроблена модель синхронного вакуумного вимикача (рис. 2.2-2.4), яка реалізує унікальну функцію керованого включення та відключення [9]. Момент часу комутації полюсів синхронного вимикача визначається за допомогою блоків *Start1-Start3* (рис. 2.3 і 2.4). Силкові контакти та електрична дуга у міжконтактному проміжку моделюються блоками *Contact1-Contact3* та *Arc1-Arc3* (рис. 2.2).

Опір електричної дуги в моделі вимикача враховується активним опором, пропорційним величині струму, що відключається.

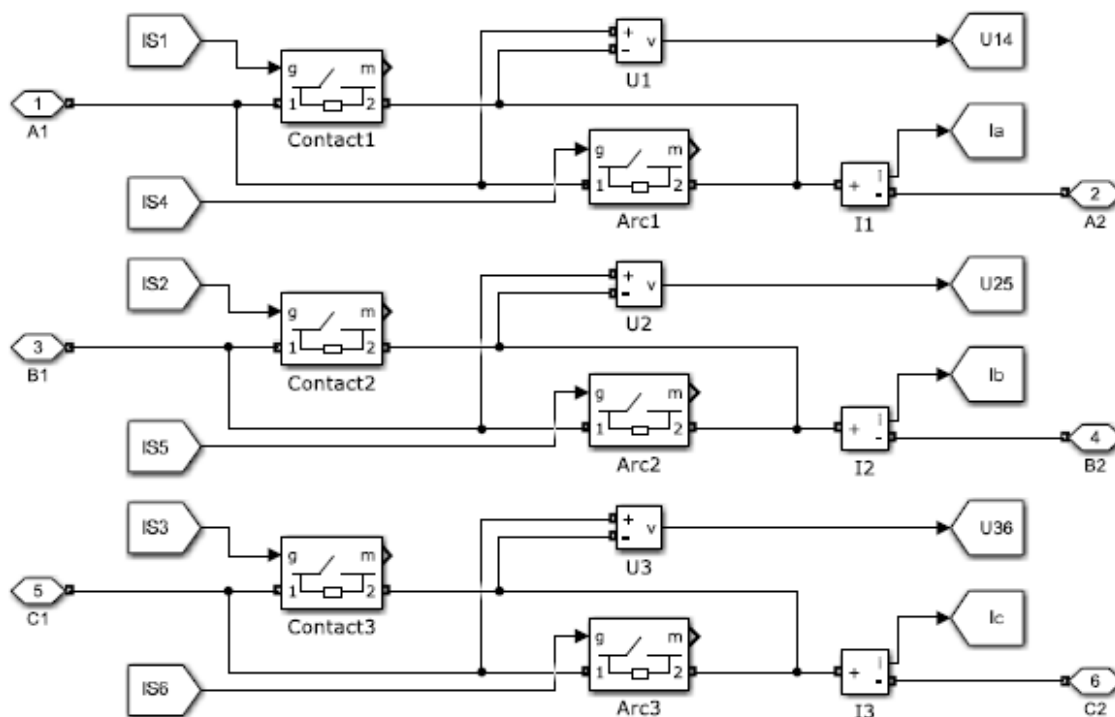


Рисунок 2.2. Зовнішній вигляд моделі синхронного вакуумного апарату

Управління включенням та відключенням синхронного вимикача реалізовано спеціально розробленими блоками *CotrolledOpening* та *CotrolledClosing*, представленими на рис. 2.3 та 2.4.

При подачі команди на відключення (рис. 2.3) відбувається зростання електричної міцності міжконтактного проміжку, що реалізовано для кожного полюса вимикача блоками *DielectricStrength1- Strength3*. Для вимірювання струмів у фазах застосовуються амперметри *I1-I3*, і у разі досягнення струмом в одній із фаз значення струму зрізу вимикача подається команда на гасіння електричної дуги у цій фазі за допомогою блоків *ArcExtinction1-ArcExtinction3*.

Між контактами вимикача вимірюється напруга відновлення вольтметрами *U1-U3*, і у разі недостатньої електричної міцності міжконтактного проміжку блоками *ArcReignition1-ArcReignition3* направляється керуючий сигнал на запалювання дуги. Далі гасіння дуги можливе тільки при проходженні струму через нульове значення зі швидкістю

не більше заданої або віртуальних зрізах струму. Блоки *ArcExtinction4*-*ArcExtinction6* формують сигнал, що управляє, на згасання дуги.

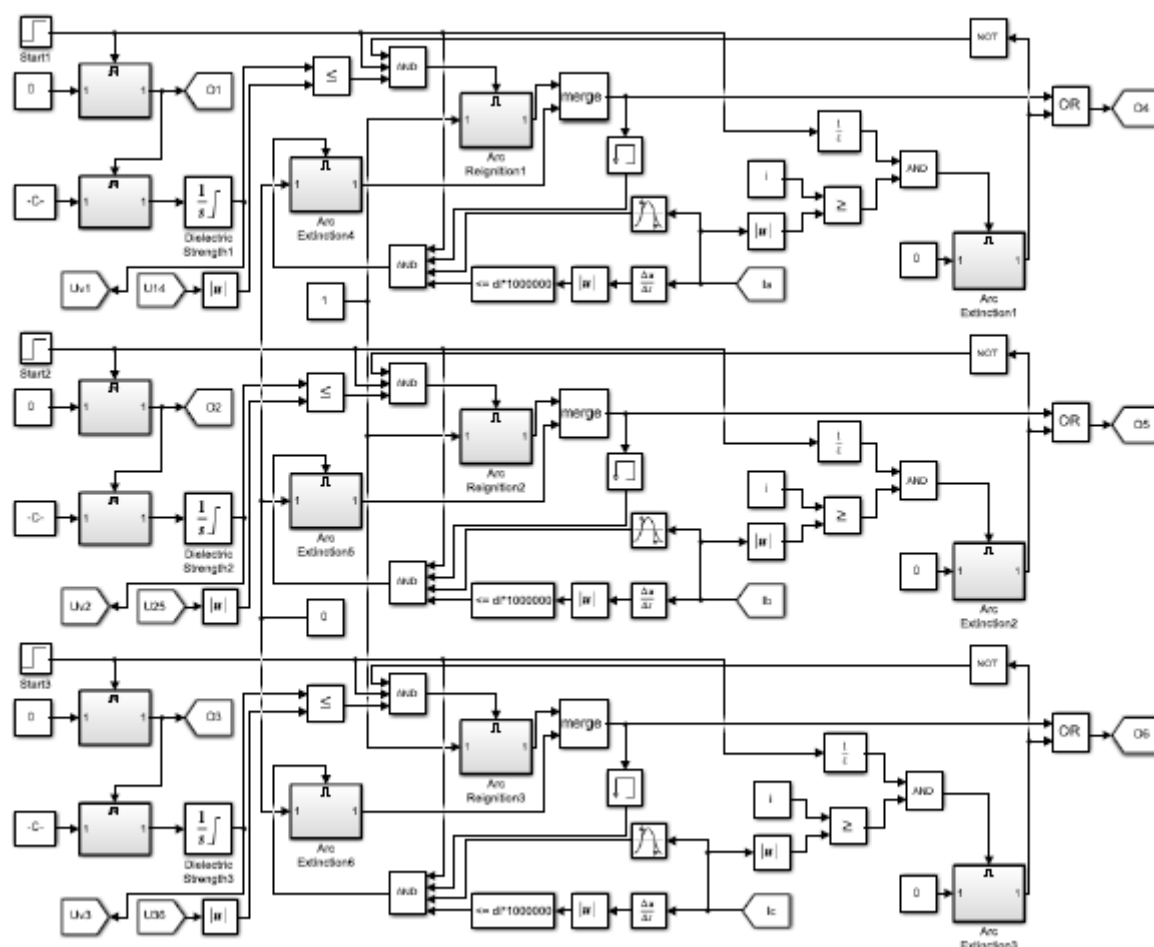


Рисунок 2.3. Блок CotrolledOreping

Після подачі команди на включення (рис.2.4) контакти вимикача починають зближуватись, що ініціює процес зниження електричної міцності міжконтактного проміжку (блоки *DielectricStrength1* – *DielectricStrength3*). Керуючий сигнал на ПЗ електричної дуги визначається блоками *ArcIgnition1*-*ArcIgnition3*. Команда на згасання електричної дуги формується блоками *ArcExtinction1*-*ArcExtinction3*.

Модель кабельної лінії реалізована лінією з розподіленими параметрами за допомогою блоку *Distributed Parameters Line*. У блоці є можливість задавати активні, індуктивні та ємнісні параметри за прямою та нульовою послідовностями. Стандартний блок враховує скін-ефект, тобто. збільшення

активного опору при зростанні частоти вхідного струму, тому в моделі вводиться додатковий активний опір при частоті перехідного процесу.

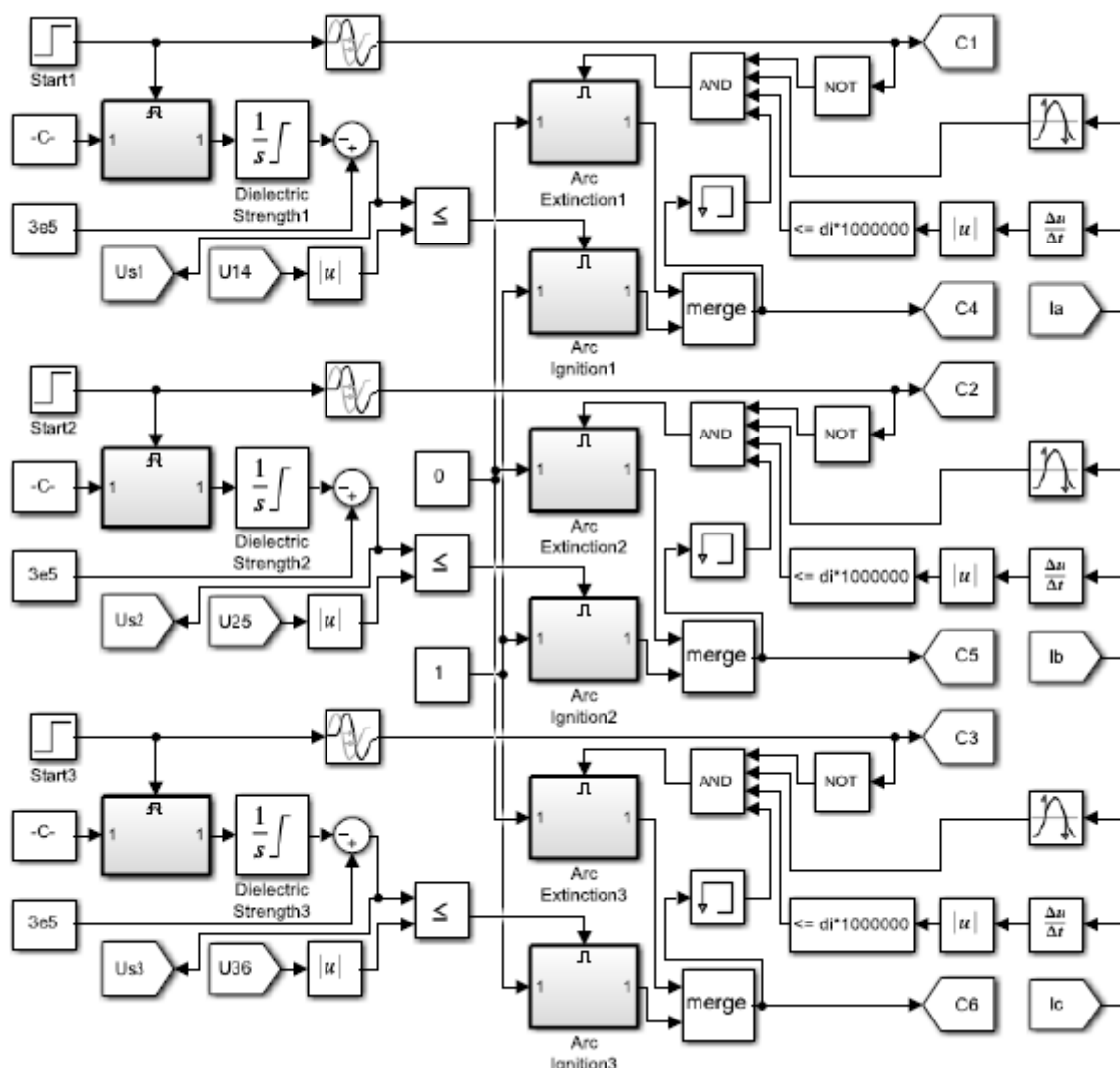


Рисунок 2.4. Блок CotrolledClosing

Моделювання електродвигуна виконано блоком *Machine*. Блок асинхронного двигуна складається з моделей електричної частини та механічної частини [5]. Параметри блоку визначаються за методом [7] і підходять для моделювання нормального режиму роботи електродвигуна, однак у пусковому режимі струми завищені. Тому для режиму пуску опору двигуна визначаються за виразами, поданими в [7].

Дослідження комутаційних перенапруг вимагає врахування ємнісних зв'язків в елементах мережі, що реалізовано стандартними блоками *RLC Branch*. Перевірка працездатності та адекватності розробленої імітаційної

моделі електричної мережі 6 (10) кВ при комутації реактивних навантажень виконано на основі порівняння отриманих результатів з експериментальними даними, представленими в [14].

На рис. 2.5, а [10] наведені експериментальні осцилограми напруги при відключенні пускового струму загальмованого електродвигуна напругою 6 кВ потужністю 200 кВт вакуумним вимикачем. Довжина кабельної лінії між двигуном та вимикачем становить 100 м. Для порівняння на рис. 2.5 б показані осцилограми напруг, виконані за допомогою моделі для умов цього експерименту.

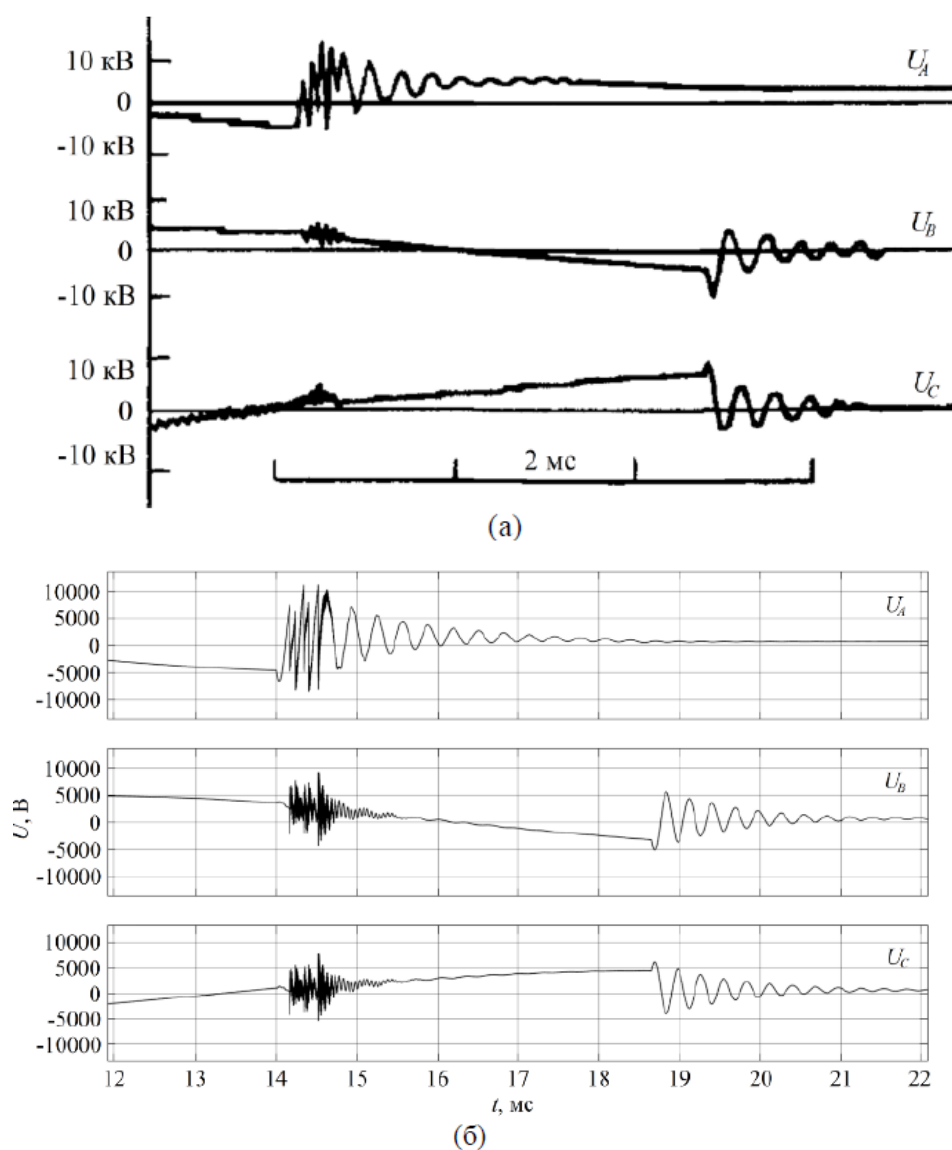


Рисунок 2.5. Напруги при відключенні пускового струму електродвигуна: експериментальні дані (а); моделювання (б)

Експериментальні осцилограми процесу включення електродвигуна (напруга 10 кВ, потужність 2000 кВт, довжина кабелю 290 м) вакуумним вимикачем представлені на рис. 2.6, а [10]. Відповідні криві, отримані за допомогою імітаційного моделювання, наведено на рис. 2.6, б.

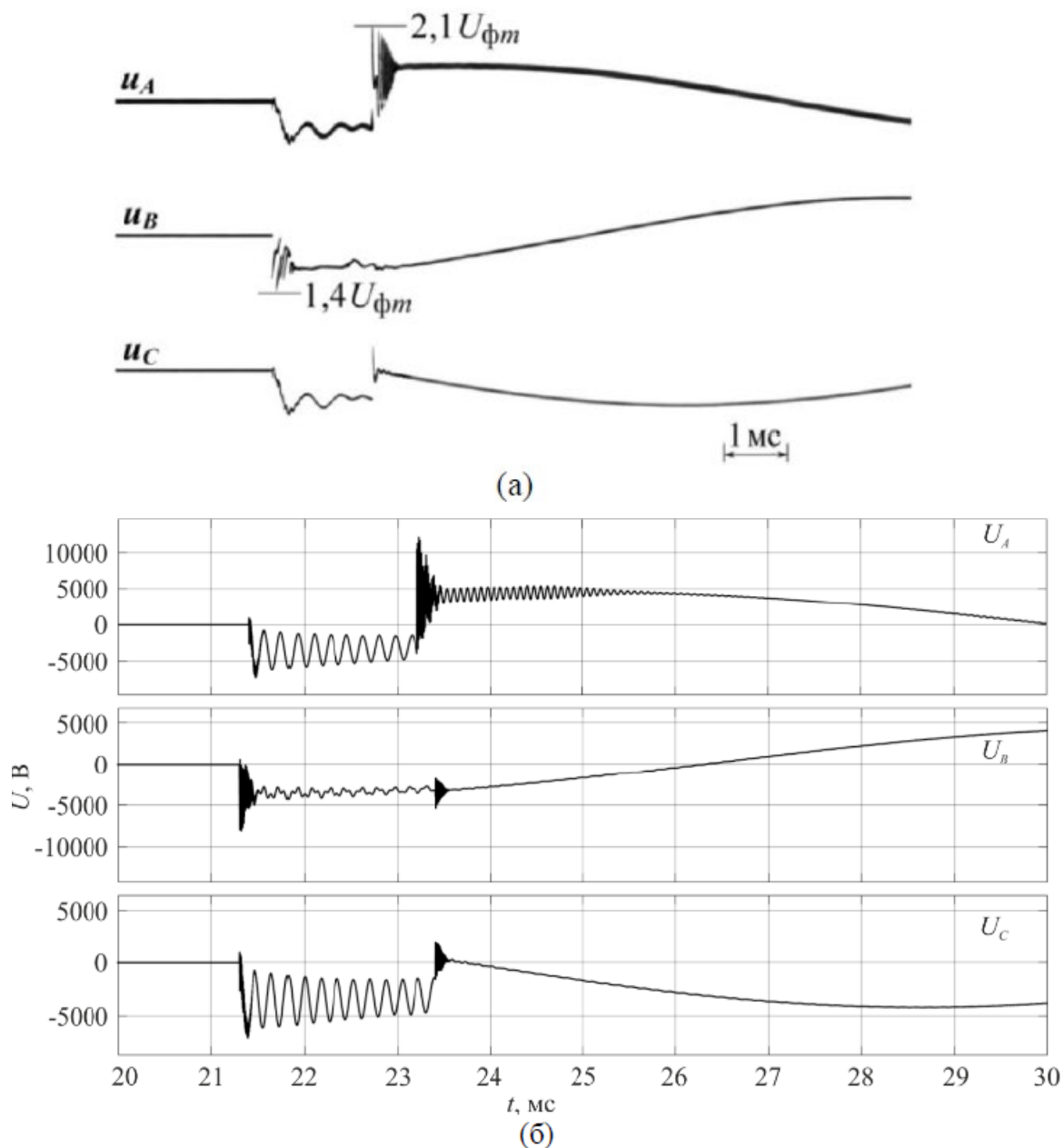


Рисунок 2.6. Напруги при включенні електродвигуна: експериментальні дані (а); моделювання (б)

Результати, отримані за запропонованою моделлю електричної мережі 6 (10) кВ, мають хорошу відповідність з експериментальними даними.

2.2. Критерії керованого управління відключенням електродвигуна

Основними критеріями керованого відключення електродвигуна є мінімізація рівня перенапруг та виключення ПЗ дуги.

Найкраще рішення керованого відключення електродвигуна може бути знайдено варіюванням моменту часу розмикання полюсів вимикача. Подальші дослідження проведені для електродвигунів невеликою потужністю (200-500 кВт), що працюють у режимі пуску та підключені короткими кабельними лініями (до 25 м).

На рис. 2.7 представлені результати дослідження одночасного відключення трьох фаз вимикача у різні моменти часу. У цьому випадку високі рівні перенапруг і ПЗ дуги виникають протягом малого проміжку часу, що відповідає найменшим значенням струму в одній із трьох фаз. Причиною появи високих рівнів перенапруг є ПЗ дуги в першому відключається полюсі вимикача, що викликають значні коливання струмів у всіх фазах і, як наслідок, віртуальні зрізи струму. Для виключення причин утворення віртуальних струмів зрізу потрібно проводити комутацію фаз вимикача різночасно.

На рис. 2.8 наведено результати дослідження різночасного відключення полюсів вакуумного вимикача. Комутація першої фази (рис. 2.8, а, в) в більшості випадків не супроводжується високочастотними перенапругами, проте в моменти часу, відповідні значенням струму не більше струму зрізу вимикача, спостерігаються ПЗ дуги і, відповідно, перенапруги. Тому для виключення ПЗ дуги відключення першої фази вимикача доцільно проводити заздалегідь до перетину струмом нульового значення.

При цьому слід враховувати, що збільшення часу горіння дуги в міжконтактному проміжку негативно відбивається на ресурсі вимикача. Таким чином, для забезпечення надійного відключення електродвигуна, момент розмикання першого полюса вимикача слід задавати з випередженням перетину струмом нульового значення на 1,25 мс.

При відомому моменті комутації першої фази проводиться розмикання другого полюса вимикача (рис. 2.8, б, г). У цьому випадку ПЗ дуги виникають

при комутації протягом малого проміжку часу, що відповідає низьким значенням струму.

На рис. 2.9 представлені осцилограми напруг і струмів при реалізації керованого відключення рухового навантаження. Розмикання полюсів апарату необхідно здійснювати одночасно з випередженням досягнення струмами значень струмів зрізу вимикача для виключення ПЗ дуги, віртуальних зрізів струму та збереження ресурсу вимикача. Кероване відключення рухового навантаження дозволяє знизити перенапруження до значень не більше $2,3 \cdot U_{\text{ном}}$.

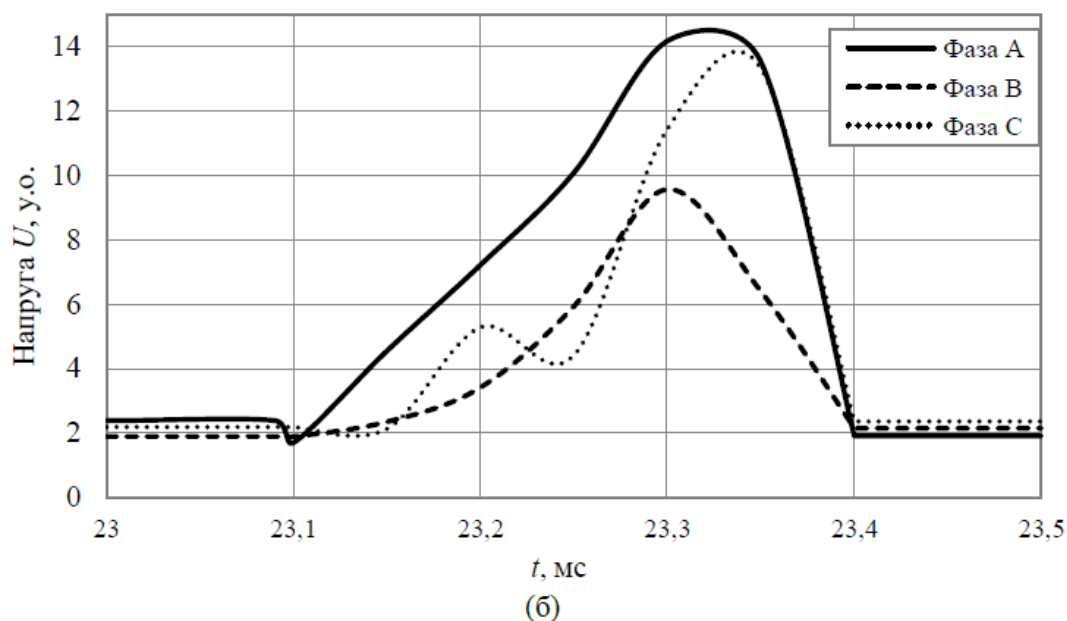
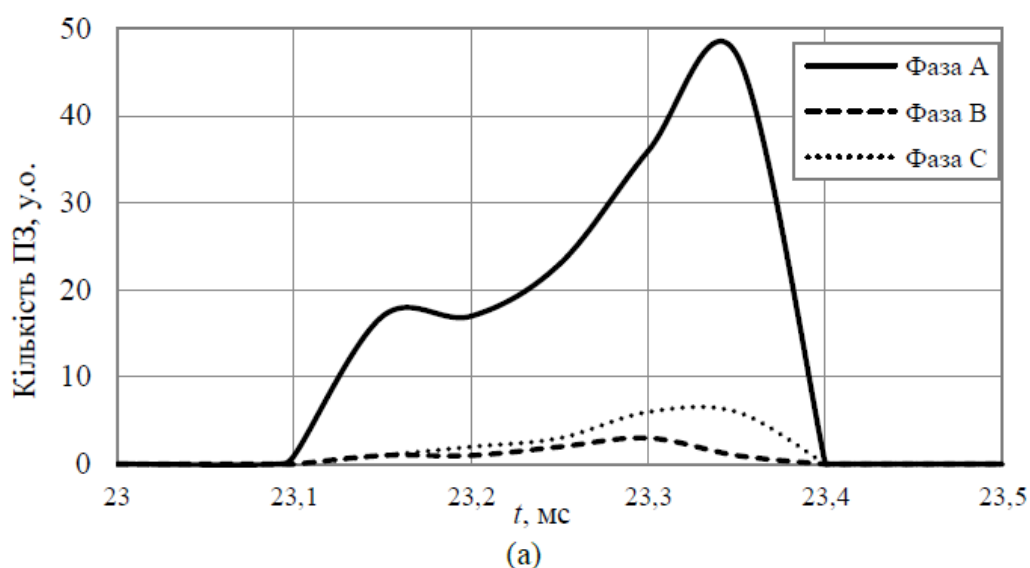


Рисунок 2.7. Одночасне відключення фаз електродвигуна: залежність кількості повторних запалювань (а); напруги від моменту комутації (б)

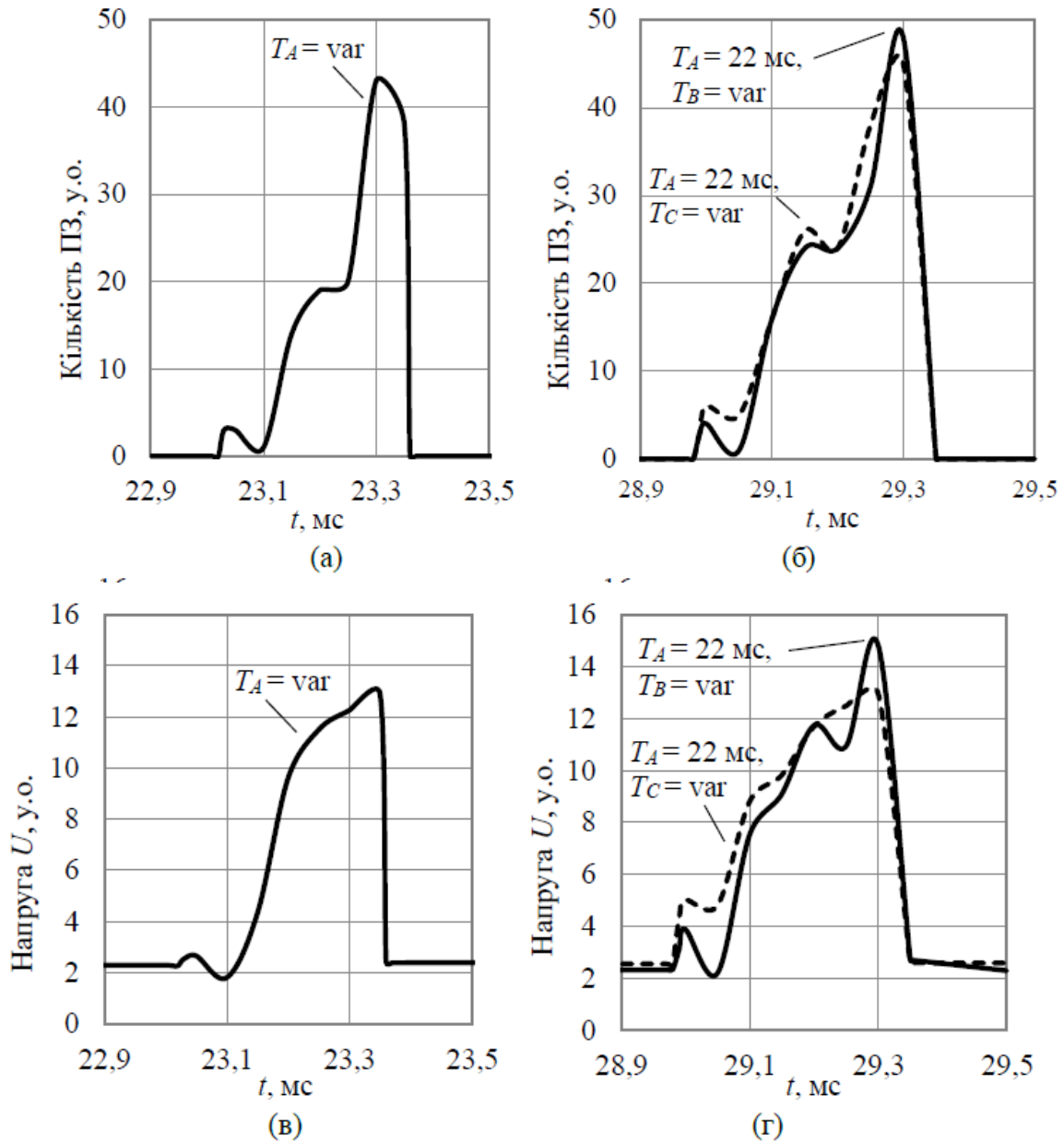


Рисунок 2.8. Різночасне відключення фаз електродвигуна: залежність кількості повторних запалювань дуги (а, б); напруги від моменту комутації (в,г)

Як критерії керованого включення рухового навантаження доцільно прийняти відсутність передпробів і мінімізацію перенапруг. При одночасному включенні фаз електродвигуна передпроби виникають будь-якої миті комутації.

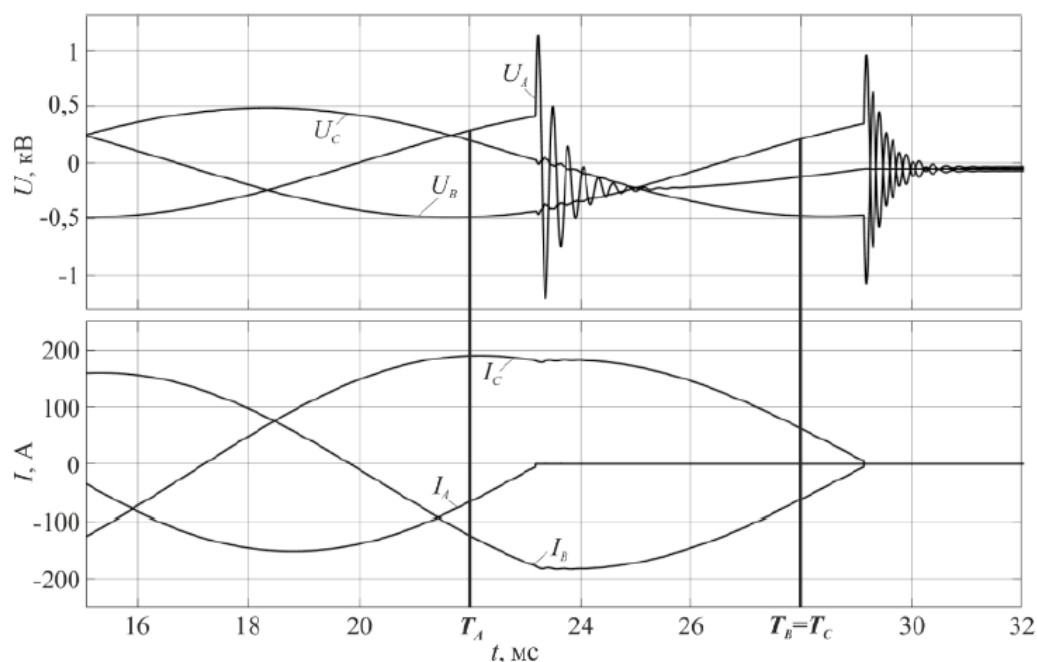


Рисунок 2.9. Кероване відключення рухового навантаження

На рис. 2.10 наведено результати дослідження різночасного включення фаз вимикача. Замикання першого полюса вакуумного вимикача біля нульового значення фазної напруги не викликає передпробоїв і високочастотних перенапруг. Замикання другого полюса вимикача в більшості випадків супроводжується передпробоями і високочастотними перенапругами, проте в моменти часу близько нульового значення лінійної напруги між першими включеними фазами не викликає передпробоїв і перенапруг. Замикання полюса вимикача, що залишився в роботі, без передпробоїв можливо поблизу нульового значення фазної напруги на цьому полюсі.

Виходячи з вищесказаного, кероване включення рухового навантаження без передпробоїв і перенапруг можливо за наступним алгоритмом: комутація першого і останнього полюсів вимикача здійснюється при переході їх фазних напруг через нульове значення, другого полюса - при переході лінійної напруги між переходом лінійного напруги між переходом лінійного напруги. Напруги та струми при керованому включенні електродвигуна представлені на рис. 2.11.

Кероване включення електродвигунів пред'являє до вимикача високі вимоги щодо стабільності часу спрацьовування полюсів апарату. Розкид

замикання полюсів синхронного вимикача повинен становити трохи більше 0,05 мс.

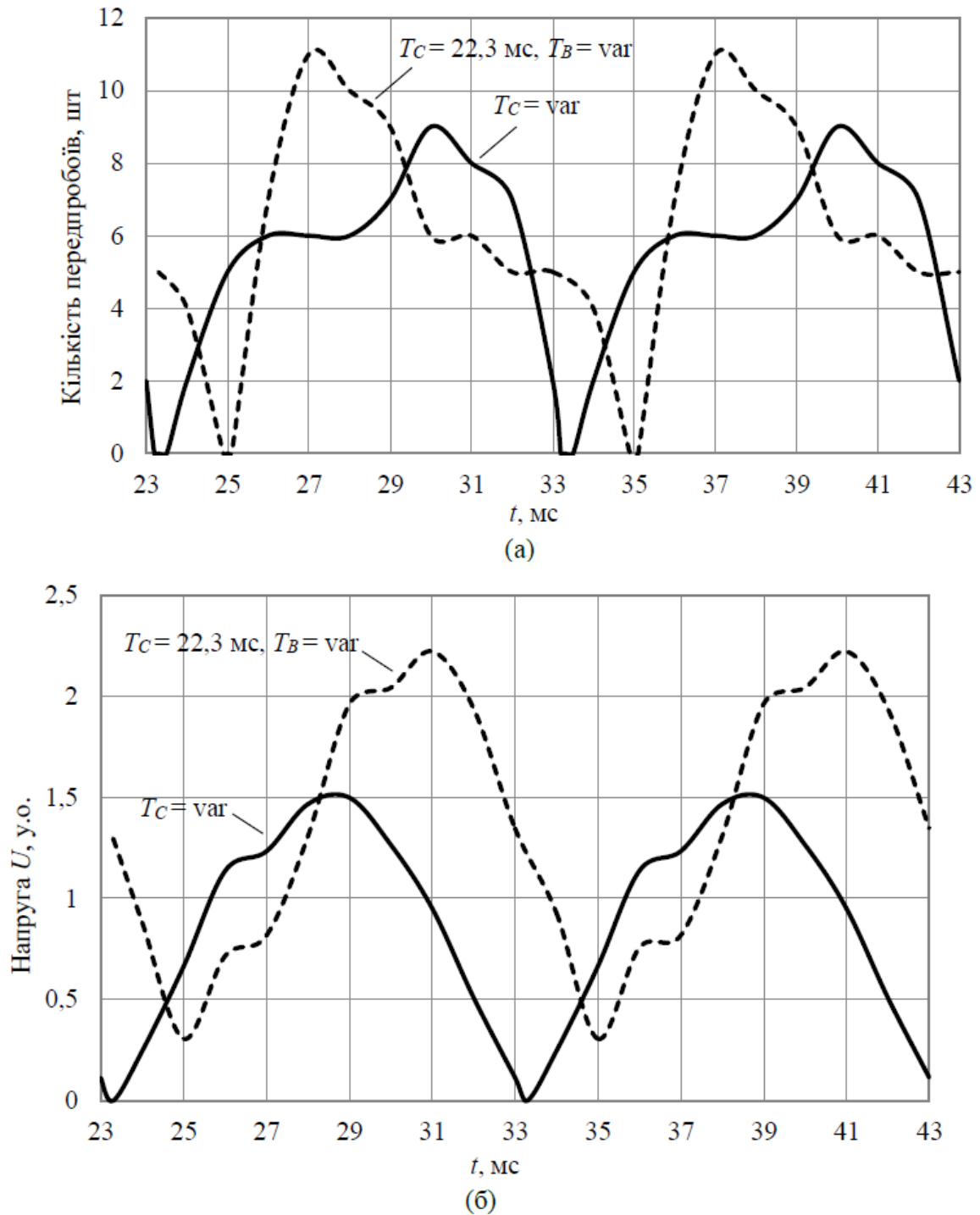


Рисунок 2.10. Різночасне включення фаз електродвигуна: залежність кількості передпробів (а); напруги від моменту комутації (б)

У [16] представлені результати експериментального дослідження точності роботи вакуумного вимикача типу EX-BBC SMARTIC 6(10)-20/1000 виробництва з функцією різночасної комутації полюсів. Максимальні розкиди

часу спрацьовування полюсів вимикача не перевищують 0,5 мс при відключенні та включенні.

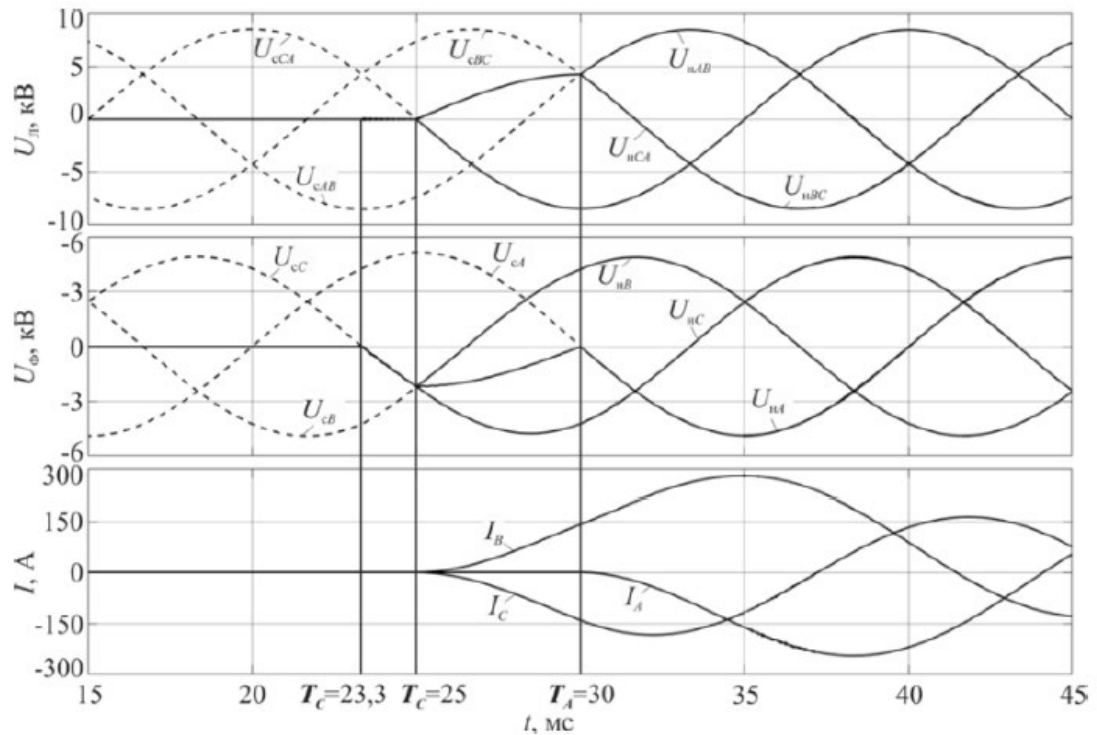


Рисунок 2.11. Кероване включення рухового навантаження

Висновки по другому розділу

З результатів дослідження випливає, що кероване включення електродвигунів без передпробойів сучасними вакуумними вимикачами неможливе. Реалізація керованого відключення електродвигунів без виникнення ПЗ дуги та високочастотних перенапруг в даний час можлива.

ВИСНОВКИ

Застосування розглянутих моделей для аналізу перехідного процесу при комутації електричної машини дозволяє зробити такі висновки:

1. При збільшенні ємності навантаження відбувається значне зниження амплітуди очікуваної напруги і згладжування фронту хвилі імпульсу напруги, що відновлюється. Додатково підключення ємність призводить до зменшення частоти вільних коливань, що у свою чергу призводить до зниження активного опору фазної обмотки двигуна і до збільшення часу протікання перехідних процесів при відключенні.

2. Зі збільшенням величини струму зрізу збільшуються: амплітуда очікуваної напруги; початкова швидкість зміни напруги, що відновлюється; тривалість перехідного процесу.

3. У разі, коли зріз струму відбувається на підйомі негативної синусоїди струму, амплітуди мутаційних перенапруги зростають у порівнянні з перенапругами, що виникають при передчасному обриві струму тієї ж величини, але протилежної полярності.

Отримані результати моделювання комутаційних перенапруги без урахування повторних запалювань дуги можна віднести до «ідеального» вимикача, тому вони не відображають повної картини процесів, що протікають у навантаженні, що відключається. У реальних комутаційних апаратах процеси комутації супроводжуються багаторазовими повторними запалюваннями дуги. Тому необхідним є моделювання перенапруги з урахуванням повторних запалювань дуги у вимикачі.

У кваліфікаційній роботі розглянуто вплив моментів комутації полюсів вимикача на рівень перенапруги. Виявлено, що при відключенні електродвигуна в моменти випереджають перехід фазних струмів через нульові значення ПЗ дуги та високочастотні перенапруги не виникають. Включення електродвигуна без попередніх пробів і високочастотних перенапруги можливе у разі замикання першого по послідовності комутації і останнього полюсів вимикача при переході фазної напруги через нульове

значення, другого полюса - при переході лінійної напруги між першою і другою фазами через нульове значення.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Правила улаштування електроустановок/ МІНІСТЕРСТВО ЕНЕРГЕТИКИ ТА ВУГІЛЬНОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ УКРАЇНИ/ Наказ №476 від 21.07.2017р.- Київ, 2017.

2. В.Ф Мануйлов, Перенапруги в мережах 6(10) – 35 кВ при комутаціях вимикачами. Процеси в дугастих системах і електричних мережах 6(10) – 35 кВ при комутаціях вимикачами // Кіровоградський національний технічний університет/ Наукові записки, вип.10, част.І
<https://dspace.kntu.kr.ua/server/api/core/bitstreams/a9896ab0-3d26-463d-9d53-b683911dc6a5/content>

3. Василюк С. В., Василюк К. С. Техніка високих напруг: навчальний посібник [Електронне видання]. – Рівне : НУВГП, 2018. – 187 с.

4. Дригальський С. І. ДОСЛІДЖЕННЯ ІНДУКОВАНИХ ПЕРЕНАПРУГ НА ЛІНІЯХ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАВАННЯ НАПРУГОЮ 6-35 КВ З РІЗНИМИ ТИПАМИ ПРОВІДІВ // Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут"

5. Сабарно Л. Р., Кошман В. І., Севастюк І. М. ДОСЛІДЖЕННЯ ДУГОВИХ ПЕРЕНАПРУГ У ВИПАДКУ ОДНО- І ДВОФАЗНИХ ЗАМИКАНЬ НА ЗЕМЛЮ У РОЗПОДІЛЬНІЙ МЕРЕЖІ З ІЗОЛЬОВАНОЮ НЕЙТРАЛЛЮ// Інститут електродинаміки Національної академії наук України (м. Київ)/
<https://repo.btu.kharkov.ua/bitstream/123456789/6860/1/6.pdf>

6. З.М. Бахор, Б.І. Дурняк, А.Я. Яцейко, Р.А. Похна Перенапруги під час вимкнення двигунів// Видавництво Національного університету «Львівська політехніка», 2003.-120с.

7. Вакуумний вимикач 6, 10, 35 кВ: принцип роботи (схема) [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу:
<http://dovidkam.com/remont/elektrika/vakuumnij-vimikach-6-10-35-kvprincip-roboti-sxema.html>.

8. Основи електропостачання: метод. вказівки до виконання лабораторної роботи «Вивчення вакуумних вимикачів та умов їх вибору» для здобувачів

першого (бакалаврського) рівня вищої освіти денної форми навч. зі спец. 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» / Держ. біотехнол. ун-т; авт.-уклад.: С. А. Попадченко, О. А. Савченко – Харків: [б. в.], 2023. – 36 с.

9. Лелюк М.А. Аналіз роботи привідних механізмів вакуумних вимикачів середньої напруги / М.А. Лелюк, В.В. Литвиненко // Вісник Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут”. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2020. – № 1. – С. 22-26

10. Кідиба В.П. Релейний захист електроенергетичних систем: Підручник. – Львів: Видавництво Національного університету "Львівська політехніка", 2013. – 533 с.

11. Кутін В. М. Релейний захист електричних станцій: Навчальний посібник / В. М. Кутін, О. Є. Рубаненко, В. М. Лагутін. - Вінниця: ВНТУ, 2007. - 110 с.

12. В. І. Романовський і С. М. Леbedка, «АНАЛІЗ ЗАМИКАНЬ НА ЗЕМЛЮ В МЕРЕЖАХ 6 КВ ДЛЯ ВИБОРУ ОПТИМАЛЬНОГО СПОСОБУ ЗАЗЕМЛЕННЯ НЕЙТРАЛІ», Вісник ВПІ, вип. 1, с. 101–104, Листоп. 2010.

13. Шевченко С. Ю. Особливості вибору обмежувачів перенапруги в мережах 6-35 кВ / С. Ю. Шевченко, О. М. Довгалюк, О. Є. Піротті // Вісник Чернігівського державного технологічного університету. Серія : Технічні науки. - 2013. - № 2. - С. 224-230. - Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vcndtn_2013_2_35.

14. Dullni. E. A family of vacuum circuit-breakers with worldwide applications using common components / E. Dullni., H. Fink, M. Heimbach, C. Reuber // February 2001. DOI: 10.1049/cp:20010680. SourceIEEE Xplore. Conference: Electricity Distribution, 2001. Part 1: Contributions. CIRED. 16th International Conference and Exhibition on (IEE Conf. Publ No. 482) Volume: 1.