

**НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ІНСТИТУТ ЕЛЕКТРОДИНАМІКИ**

В.Куч

КУЧАНСЬКИЙ ВЛАДИСЛАВ ВОЛОДИМИРОВИЧ

УДК 621.311.1.001.57

**АНАЛІЗ ТА УПРАВЛІННЯ РЕЖИМАМИ РОБОТИ
МАГІСТРАЛЬНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ ЗА УМОВ
СТРУКТУРНОЇ НЕСИМЕТРІЇ**

Спеціальність 05.14.02 – електричні станції, мережі і системи.

РЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

КИЇВ – 2025

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана у відділі оптимізації систем електропостачання Інституту електродинаміки НАН України, м. Київ.

Науковий
консультант

– доктор технічних наук, професор
Буткевич Олександр Федотович,
Інститут електродинаміки НАН України, головний
науковий співробітник відділу моделювання
електроенергетичних об'єктів та систем.

Офіційні опоненти:

– доктор технічних наук, професор
Лежнюк Петро Дем'янович,
Вінницький національний технічний університет
МОН України, професор кафедри електричних
станцій та систем;

– доктор технічних наук, професор
Сегеда Михайло Станкович,
Національний університет «Львівська
політехніка» МОН України, завідувач кафедри
електроенергетики та систем управління;

доктор технічних наук, професор
Гребченко Микола Васильович,
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря
Сікорського» МОН України, професор кафедри
електропостачання.

Захист дисертації відбудеться «2» вересня 2025 р. о 14⁰⁰ годині на
засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.187.03 в Інституті електродинаміки
НАН України за адресою: 03057, Київ – 57, проспект Берестейський, 56, тел.
(044) 366-26-45.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Інституту електродинаміки
НАН України за адресою: 03057, Київ – 57, проспект Берестейський, 56.

Автореферат розісланий «31» листопада 2025 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради Д 26.187.03
канд. техн. наук

Олександр ДЖУРА

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Обґрунтування вибору теми дослідження. В умовах сьогодення проблема підвищення надійності та ефективності функціонування магістральних електричних мереж (МЕМ) України набула особливої гостроти. Пошкодження електроустаткування окремих фаз електричних мереж, насамперед однофазних шунтувальних реакторів (ШР) та автотрансформаторів (АТ), під час експлуатації та внаслідок ворожих обстрілів зумовлює зміну структури МЕМ і перехід до неповнофазних режимів, що разом з природними причинами призводить до виникнення *структурної несиметрії* електричних мереж.

Однією з природних причин несиметрії в МЕМ є пофазна відмінність параметрів ліній електропередачі (ЛЕП), що може призводити до переобтяження АТ та до збільшення сумарних технологічних втрат електроенергії. За неповнофазних режимів МЕМ зростають сумарні втрати активної потужності (на 15-20% у порівнянні з повнофазними режимами) та з'являється загроза виникнення резонансних перенапруг і значної аперіодичної складової струму, що призводять до пошкодження основного обладнання МЕМ та розвитку системної аварії. Тому актуальними є теоретичні дослідження та відповідні практичні розробки засобів аналізу та керування стаціонарними і перехідними режимами МЕМ за умов структурної несиметрії для підвищення надійності та ефективності функціонування МЕМ.

Проблемі підвищення надійності та ефективності функціонування МЕМ присвятили значну кількість праць такі вчені, як Берман А.П., Веприк Ю.М., Кузнецов В.Г., Кулик В.В., Лежнюк П.Д., Постолатій В.М., Солдатов В.А., Тугай Ю.І., Фраткин О.І. Maria Cristina Tavares, Božidar Filipović-Grčić, Igor Ivanković, Tahir Midhat Lazimov, Sergio Kurokava та інші, однак розроблені до цього часу моделі та методи аналізу режимів МЕМ стосуються, переважно, симетричних нормальних режимів. Тому вдосконалення існуючих та розроблення нових моделей і методів аналізу та керування режимами МЕМ за умов структурної несиметрії є актуальними для об'єднаної енергетичної системи (ОЕС) України.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота виконана в Інституті електродинаміки НАН України відповідно до планів науково-дослідних робіт (НДР) НАН України.

В дисертації наведено результати досліджень, які проводилися під час виконання таких НДР: «Розробка методів і моделей аналізу резонансних процесів та мінімізації втрат електроенергії в несиметричних режимах роботи електричних мереж» («Безпека-3», 2014-2018 рр., № ДР 0114U001465); «Розробка методів і моделей для аналізу електромагнітних перехідних процесів в електричних мережах з метою запобігання появі небезпечних перенапруг» («Безпека-4», 2019-2023рр., № ДР 0119U001280); «Розроблення моделей та методів аналізу аномальних режимів електричних мереж в умовах часткового пошкодження електрообладнання для відновлення їх безпечного функціонування і модернізації» («Безпека-5», 2024 р., № ДР 0124U000394); «Методи та засоби моделювання й обробки інформації при моніторингу електроенергетичних систем» («Інтелмер-2», 2017-2021 рр., № ДР 0117U002583); «Дослідити режими та створити засоби протиаварійного керування завантаженням перетинів енергосистем зі значною часткою відновлювальних

джерел енергії» («Монітор-ПК» 2016-2018 рр., № ДР 0115U004417); «Розроблення моделей об'єднаної енергосистеми України та визначення заходів з її інтеграції до континентальної енергосистеми європейських країн – ENTSO-E» («Монітор-3», 2019-2021 рр., № ДР 0119U001211); «Моделі та засоби запобігання погіршення якості електропостачання промислових споживачів» («Монітор-4», 2022-2024 рр., № ДР 0122U001266); «Розвиток теорії, розроблення методів інтелектуалізації технологічних процесів та засобів керування, моніторингу, діагностування і вимірювання в електроенергетичних та електротехнічних системах» («Інтехен-2», 2020-2021рр., № ДР 0120U002125); «Підвищення надійності виконання комутацій в компенсованих магістральних лініях електропередачі надвисокої напруги» («Об'єднання-3», 2016-2018 рр., № ДР 0116U006587); «Підвищення надійності та ефективності роботи магістральних електричних мереж ОЕС України в умовах наявності джерел несинусоїдальних спотворень» («Нова енергетика», 2019-2021рр., № ДР 0119U001630); «Розвиток елементів теорії, розроблення нових методів розрахунку та створення засобів для підвищення надійності та енергоефективності режимів і технологічних процесів в електроенергетичних та електротехнічних системах» («Режим-1», 2022 р., № ДР 0122U001494); «Забезпечення стійкості та надійності національної електроенергетики в умовах синхронної роботи ОЕС України з континентальною європейською енергетичною системою ENTSO-E» («Режим-2», 2023-2024 рр., № ДР 0123U1001769). Під час виконання зазначених НДР здобувач був відповідальним виконавцем основних розділів, присвячених дослідженню аномальних режимів, викликаних як джерелами спотворень, так і зміною структури електричної мережі, а під час виконання НДР «Розробка заходів та технічних засобів компенсації неповнофазних режимів магістральних електричних мереж ОЕС України (шифр: 16/01-2020/1404-20)» 2020-2021, № ДР 0120U000148 був її науковим керівником.

Мета і завдання досліджень. Мета роботи полягає у подальшому розвитку теорії в напрямку розроблення нових моделей та методів аналізу і управління режимами роботи магістральних електричних мереж за умов структурної несиметрії для підвищення надійності та ефективності їхнього функціонування.

Для досягнення поставленої мети необхідно було виконати такі **основні завдання**:

- урахувати в математичній моделі МЕМ коронування проводів повітряних ліній електропередавання та залежність їхніх опорів від температури;
- визначити можливість активного використання керованих шунтувальних реакторів (КШР) як засобів впливу на режими роботи електричних мереж під час їх оптимізації;
- розробити математичні моделі однофазних ШР, АТ та КШР для аналізу режимів роботи МЕМ за умов структурної несиметрії;
- розробити метод визначення індуктивності статичного синхронного компенсатора в онлайн режимі для компенсації міжфазної ємності за критерієм мінімуму тривалості циклу однофазного автоматичного повторного вмикання (ОАПВ);

- розробити метод визначення часу вимкнення елегазового вимикача (ЕВ) для налаштувань пристроїв керованої комутації ЕВ для комутацій ШР та АТ, що мають різні схеми з'єднання обмоток та конструкції магнітопроводу;
- дослідити вплив керованої поперечної компенсації зарядної потужності на умови існування та значення параметрів аперіодичної складової струму, резонансних перенапруг та повторної дуги підживлення в циклі спрацьовування ОАПВ;
- розробити математичну модель 3-фазної електропередачі з КШР для аналізу аварійних режимів у фазних координатах у разі складних випадків несиметрії;
- розробити математичні моделі груп однофазних АТ та КШР для аналізу можливості функціонування їх в неповнофазних режимах роботи;
- дослідити та проаналізувати умови виникнення резонансних перенапруг в несиметричних режимах роботи магістральних електричних мереж;
- дослідити та проаналізувати залежність струму дуги підживлення від значень напруги в кінцевих вузлах лінії.

Об'єктом дослідження дисертаційної роботи є режими роботи МЕМ.

Предметом досліджень є моделі, методи та засоби аналізу і управління режимами функціонування МЕМ.

Методи дослідження. Теоретичну основу досліджень становлять теорія електромагнітних перехідних процесів в електричних колах, принципи та методи еквівалентування моделей МЕМ. Для математичної формалізації режимів роботи МЕМ, за умов структурної несиметрії, використано методи аналізу багатофазних електричних кіл; для формування математичних моделей використано аналітичні методи аналізу несиметричних режимів МЕМ. Для перевірки достовірності результатів досліджень використано результати натурних експериментів в МЕМ.

Наукова новизна отриманих результатів.

1. Вперше розроблено математичну модель трифазної лінії електропередачі надвисокої напруги (ЛЕП НВН), яка враховує вплив коронного розряду на рівень перенапруг за несиметричного режиму роботи ЛЕП, що дає змогу визначати під час моделювання перехідного процесу струму та напруги у будь-якій точці ЛЕП, значно розширюючи можливості аналізу процесів в магістральних електромережах для прийняття обґрунтованих рішень із запобігання небезпечних перенапруг.

2. Вперше запропоновано та обґрунтовано використання керованих шунтувальних реакторів для оптимізації режимів роботи магістральних електричних мереж в квазіреальному часі за критерієм мінімуму сумарних втрат активної потужності.

3. Вперше розроблено математичну модель керованого шунтувального реактора у вигляді залежностей струмів і напруг основної обмотки реактора від струму обмотки керування, що дає змогу враховувати інерційність зміни потужності реактора під час моделювання перехідних процесів, що виникають внаслідок комутацій однофазних АТ та ШР магістральних електромереж.

4. Для мінімізації сили струму дуги короткого замикання та забезпечення точності визначення моменту увімкнення від'єднаної фази вперше з використанням визначених в реальному часі струмів керованих шунтувальних

реакторів непошкоджених фаз ЛЕП НВН розроблено метод визначення індуктивності статичного синхронного компенсатора, що компенсує міжфазну ємність. Це дає змогу враховувати відмінність параметрів фаз ЛЕП НВН за наявної схеми транспозиції і визначати момент набуття напругою на контактах вимикача значень, що забезпечують задану тривалість безструмової паузи циклу однофазного автоматичного повторного ввімкнення.

5. Для налаштування пристроїв керованої комутації з метою запобігання пошкодженню дугогасильних камер елегазового вимикача вперше розроблено метод визначення часу його вимкнення, що використовує досягнення аперіодичними складовими фазних струмів нормативних значень зі збереженням послідовності фаз в момент набуття миттєвих значень струму нульових значень. Зазначеним налаштуванням забезпечується притлумлення аперіодичної складової струму в компенсованих ЛЕП надвисокої напруги та унеможливлено пошкодження дугогасильних камер.

Практичне значення отриманих результатів.

1. Запропоновано метод визначення індуктивності статичного синхронного компенсатора, що забезпечує зниження тривалості циклу спрацьовування ОАПВ шляхом компенсації електростатичної складової струму повторної дуги.

2. Обґрунтовано схему транспозиції, в якій на одному циклі транспозиції використовується два одинарних чергування проводів у просторі, причому ЛЕП поділяється на три рівні частини, на межі яких два проводи із трьох, а саме один центральний та один з крайніх, перехрещені між собою. Виявлено, що кількість транспозиційних опор на ЛЕП зі спрощеною схемою зменшується вдвічі, залишаючи незмінними коефіцієнти несиметрії зворотної послідовності напруги та струму.

3. Реалізація методу аналізу несиметричних режимів МЕМ та вибору засобів їхнього симетрування на основі універсальних розрахункових виразів дозволила виконувати оперативне оцінювання ефективності симетрування неповнофазного режиму груп АТ 750/330/15,75 кВ, ШР 750 кВ та повітряних ліній 750 кВ.

4. Розроблені моделі та методи лягли в основу методичних рекомендацій із впровадження сучасних засобів управління режимами МЕМ, які впроваджено у підрозділах координації роботи АСУ ТП електростанцій та САРЧП Департаменту балансової надійності Дирекції управління ОЕС України НЕК «УКРЕНЕРГО». Використання зазначених рекомендацій в МЕМ ОЕС України сприятиме максимально ефективному використанню пропускної здатності електричних мереж та підвищенню надійності роботи, зокрема за форс-мажорних умов.

Особистий внесок здобувача. Усі наукові положення, результати та узагальнення, що виносяться на захист, отримані автором особисто.

У наукових працях, які опубліковано у співавторстві, здобувачу належать: [1] – математичні моделі ЛЕП з врахуванням фактичної схеми транспозиції; [2, 3, 6, 14] – аналіз впливу залишкового намагнічування АТ на початкові умови виникнення резонансних перенапруг; [3, 10] – оцінювання впливу коронного розряду на умови виникнення та розвитку резонансних перенапруг в циклі

спрацьовування ОАПВ та параметричного збудження синхронних генераторів; [4] – обґрунтування застосування пристроїв керованої компенсації реактивної потужності в МЕМ; [5] – розроблення математичної моделі ЛЕП НВН з пофазною відмінністю параметрів; [7] – розроблення заходів та технічних засобів підвищення ефективності роботи МЕМ; [8] – метод вибору оптимальних кроків транспозиції повітряної лінії електропередавання; [9] – метод притлумлення повторної дуги однофазного короткого замикання в циклі ОАПВ; [11] – результати оптимізації режимів роботи МЕМ за критерієм втрат активної потужності за умов застосування КШР; [13] – метод вибору опорів компенсаційних реакторів з врахуванням впливу пофазної несиметрії ПЛ ЛЕП НВН; [14] – оцінювання впливу КШР на пропускну спроможність та натуральну потужність ЛЕП НВН; [15] – математичні моделі КШР з метою запобігання резонансних перенапруг у ненавантажених режимах роботи ЛЕП НВН; [16] – метод визначення резонансних частот ЛЕП НВН; [17] – аналіз ефективності застосування автоматичного шунтування фаз для притлумлення повторної дуги однофазного короткого замикання на землю; [18] – метод вибору значень передвімкнених активних опорів ЕВ для притлумлення аперіодичної складової струму комутаційних електромагнітних перехідних процесів; [19] – удосконалені методи аналізу аномальних режимів магістральних електричних мереж; [20-23,32] – моделювання несинусоїдних режимів роботи МЕМ і оцінювання впливу моментів ввімкнення ненавантажених АТ на умови виникнення резонансних перенапруг; [24] – розроблення заходів запобігання резонансних перенапруг у неповнофазних режимах роботи; [25] – розроблення методу оцінювання резонансних перенапруг у циклі ОАПВ; [25, 32, 33,38] – аналіз умов розвитку та характеристик резонансних перенапруг з врахуванням кореляції між параметрами ЛЕП НВН та АТ; [26] – класифікація резонансних перенапруг у несинусоїдних та несиметричних режимах; [27] – вибір уставок спрацьовування керованого пристрою комутації з метою запобігання резонансних перенапруг у несинусоїдних режимах; [30,34] – аналіз умов збудження автопараметричного резонансу у несинусоїдних режимах МЕМ; [28] – аналіз експериментальних оцінок втрат потужності на коронування повітряних міжсистемних ліній електропередавання; [29] – обґрунтування удосконаленої конструкції розщепленої фази ЛЕП; [32] – аналіз електромагнітних перехідних процесів під час комутацій ЛЕП НВН та АТ; [35] – метод визначення складових втрат активної потужності в лініях електропередавання надвисокої напруги; [36] – оцінювання впливу повздовжньої несиметрії у разі врахування фактичної схеми транспозиції на пропускну здатність ЛЕП НВН; [37] – аналіз резонансних перенапруг у циклі спрацьовування ОАПВ з КШР; [38,39] – метод визначення оптимальних значень пристроїв компенсації реактивної потужності в МЕМ; [40] – корекція несиметричних режимів роботи електроенергетичної системи; [41] – розробка методів розрахунку втрат активної потужності МЕМ; [42] – засоби підвищення ефективності неповнофазних режимів роботи МЕМ за критерієм сумарних втрат активної потужності; [43,44] – багатокритеріальна оптимізація режимів МЕМ; [45] – методи керування неповнофазними режимами роботи МЕМ; [46] – спрощена схема транспозиції проводів ЛЕП НВН.

Апробація результатів дисертації. Основні положення, наукові результати та практичні розробки дисертації доповідались та обговорювались на міжнародних наукових конференціях та семінарах, а саме: IEEE Ukraine conference on electrical and computer engineering, UKRCON (Kyiv, 2017); International conference on modern electrical and energy system, MEES-17 (Kremenchuk, Ukraine, 2017); IEEE 39 th International Conference on Electronics and Nanotechnology, ELNANO-37 (Kyiv, 2017); Міжнародний семінар «Power quality in distribution networks with distributed generation» (Kyiv, 2019); Міжнародні конференції «Контроль і управління в складних системах КУСС» (Вінниця, 2020, 2021, 2024); Міжнародні конференції «Проблеми сучасної електротехніки» (Київ, Україна, 2020, 2024).

Також результати досліджень доповідались та обговорювались на семінарах Наукової ради НАН України з комплексної проблеми «Наукові основи електроенергетики»; на засіданнях Вченої ради Інституту електродинаміки НАН України та Бюро Відділення фізико-технічних проблем енергетики НАН України.

Публікації. Основні положення і результати дисертаційної роботи опубліковано у 46 друкованих працях, із них 20 статей – у наукових фахових виданнях України та 7 статей у закордонних періодичних виданнях, з яких 10 включено в міжнародні наукометричні бази Scopus та WOS; 1 патент на корисну модель України; 3 монографії, 7 – у матеріалах та тезах доповідей на Міжнародних конференціях, які включені у Scopus, 5 розділів у колективних монографіях, які включено в міжнародні наукометричні бази Scopus та WOS.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота викладена на 324 сторінках, складається із вступу, 6 розділів, загальних висновків, списку використаних джерел та 6 додатків. Обсяг основного тексту дисертації складає 265 сторінки друкованого тексту. Робота ілюстрована 43 таблицями та 85 рисунками. Список використаних джерел містить 200 найменувань, з них 73 кирилицею та 127 латиницею.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертації, розкрито сутність і стан вирішення науково-технічної проблеми, що досліджується, наведено обґрунтування доцільності проведення досліджень, відображено зв'язок роботи з науковими програмами і планами НДР Інституту електродинаміки НАН України, сформульовано мету і завдання досліджень, наукову новизну і практичне значення отриманих результатів, зазначено особистий внесок здобувача, наведено дані про апробацію роботи та публікацію її результатів в наукових фахових виданнях.

У **першому розділі** проаналізовано особливості тривалих несиметричних режимів роботи МЕМ, викликаних структурною несиметрією, зокрема внаслідок відключення однофазних ШР та АТ. Наведено визначення терміну «структурна несиметрія», як стану, що характеризується неповнофазною схемою (неповнофазними схемами) функціонування або кількісними розбіжностями в складові обладнання фаз, що спричиняють суттєві відмінності значень параметрів фаз. Досліджено вплив фактору підвищення напруги в МЕМ понад

допустимі рівні внаслідок зменшення споживання та недокомпенсації реактивної потужності в МЕМ. Показано, що частішими та тривалішими стали випадки виходу із ладу електротехнічного обладнання МЕМ, оскільки до впливу природніх «чинників мирного часу» додався руйнівний вплив воєнних дій (табл. 1) порівняно з мирним часом (табл. 2), причому частіше відбувається пошкодження лише однієї з фаз групи однофазного електроустаткування МЕМ, наприклад, ШР та АТ, тобто виникає неповнофазний режим.

Таблиця 1

Тривалість неповнофазних режимів МЕМ України у 2022 році

Назва територіального управління	Тривалість неповнофазних режимів (години)											
	Січ.	Лют.	Бер.	Квіт.	Трав.	Чер.	Лип.	Сер.	Вер.	Жов.	Лис.	Груд.
Західне	121	44	49	102	125	105	189	149	28	574	780	745
Північне	50	77	78	47	47	77	157	99	121	784	454	789
Східне	210	145	147	95	129	87	74	154	88	890	758	489
Південне	214	178	49	141	85	44	49	66	98	589	688	578

Таблиця 2

Тривалість неповнофазних режимів МЕМ України у 2021 році

Назва територіального управління	Тривалість неповнофазних режимів (години)											
	Січ.	Лют.	Бер.	Квіт.	Трав.	Чер.	Лип.	Сер.	Вер.	Жов.	Лис.	Груд.
Західне	0	104	9	58	12	78	18	57	18	25	124	159
Північне	25	24	44	46	78	47	28	68	87	76	105	142
Східне	52	198	108	35	120	87	34	54	68	59	147	178
Південне	102	17	12	14	56	48	58	56	74	27	128	108

У розділі введено поняття структурної несиметрії МЕМ як відмінності параметрів електричних елементів, що виникає внаслідок пошкоджень або виведення з експлуатації окремих фаз (зокрема, однофазних ШР або АТ), конструктивних особливостей ЛЕП НВН (наприклад, неоднакової довжини кроків транспозиції), а також під час циклу спрацьовування ОАПВ.

Таким чином, підвищення надійності функціонування МЕМ в умовах обстрілів та ракетно-дронових атак ворога вимагають вирішення низки важливих теоретичних і практичних завдань щодо ефективного використання неповнофазних режимів роботи обладнання. Аналогічна потреба виникає і під час проведення, як планових, так і аварійних ремонтів. Недооцінка неповнофазних режимів та несвоєчасність їх корекції можуть призвести до тяжких аварій в МЕМ та ОЕС України загалом.

У другому розділі обґрунтовано доцільність використання КШР для створення керуючих впливів під час оптимізації режимів роботи МЕМ за критерієм зниження сумарних втрат активної потужності на її транспортування. Оптимізація режиму роботи МЕМ ґрунтується на визначенні оптимальних значень напруги та реактивної потужності. Використовуючи сучасні керовані

пристрої компенсації зарядної потужності ЛЕП вдається досягти більш точного та глибокого регулювання і, відповідно, мінімізувати втрати активної потужності.

На даний час в Україні експлуатуються 8 ЛЕП НВН напругою 750 кВ, на яких встановлені 22 групи однофазних шунтувальних реакторів. Керування поперечним компенсуванням дає можливість підтримувати режим натуральної потужності, якщо потік енергії змінюється під час експлуатування ЛЕП НВН. Цей ефект можна отримати шляхом використання керованого шунтувального реактору.

Для розрахунку втрат потужності в електропередачі доцільно здійснити перехід від узагальнених постійних еквівалентних чотирьохполюсників лінії до так званих коефіцієнтів втрат потужності. Втрати визначені за умовою балансу потужності електропередачі під час використання основних рівнянь. Втрати активної потужності в ЛЕП НВН (рис. 1а) без пристроїв компенсації зарядної потужності можна визначити з такого виразу:

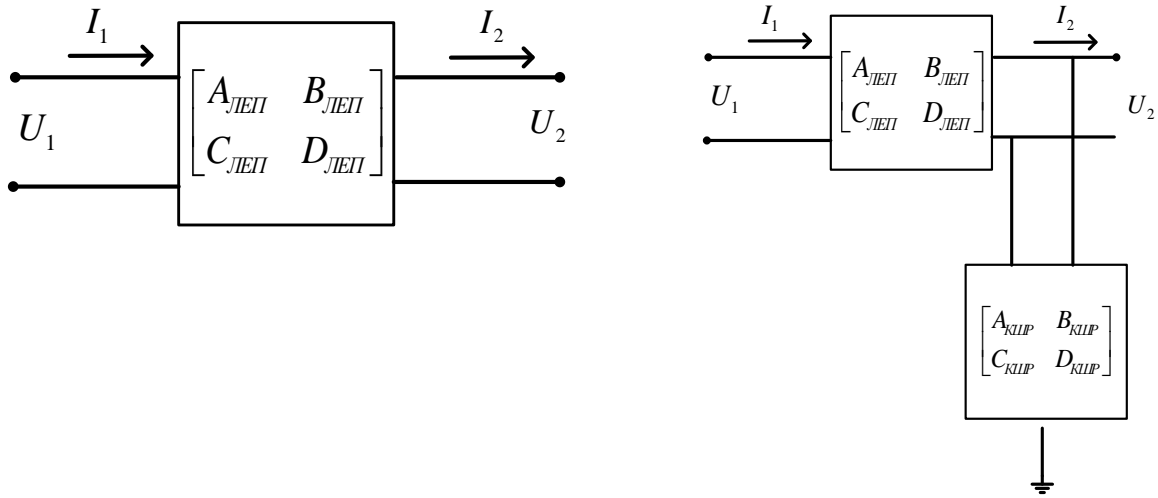
$$\begin{aligned} \Delta P_{loss} = & G \cdot (B^2 \cdot A1 - 6 \cdot (A2 + A3) + G^2 \cdot (R^2 + X) + 8) \cdot U^2 + \\ & + \left(\frac{G \cdot A1}{2} + R \right) \cdot \frac{P^2 + Q^2}{U^2} + (A3 \cdot (3 \cdot A2 - 4(A3 - 4)) - \\ & - \frac{A4^2 + G^2 \cdot X^2}{2}) \cdot P + \left(\frac{A4 \cdot A2 - A4 \cdot A3 - 7 \cdot G \cdot A2}{2} - \right. \\ & \left. - A4 + 15 \cdot G \cdot X \right) \cdot Q, \end{aligned} \quad (1)$$

де R – активний опір ЛЕП, Ом, X – індуктивний опір ЛЕП, Ом, G – активна провідність ЛЕП, См, B – реактивна провідність ЛЕП, См, U – номінальна напруга ЛЕП, кВ, P – активна потужність ЛЕП, МВт, Q – реактивна потужність ЛЕП, МВАр. Для зручності виконання перетворень були використані додаткові коефіцієнти $A1 = R^2 + X^2$; $A2 = BX$; $A3 = GR$; $A4 = BR$.

У випадку використання в схемі (рис. 1 б) пристрою КШР для керованої компенсації зарядної потужності, вираз (1) набуває вигляду:

$$\begin{aligned} \Delta P_{loss} = & \left(\frac{A1 \cdot G \cdot (B^2 + A7) + 2 \cdot [B^2 \cdot R - B \cdot n \cdot B_{Reac} \cdot G \cdot A5 - 3 \cdot R \cdot A7]}{8} - 3 \cdot R \cdot A7 \right) + \\ & + \frac{B^2 \cdot R - B \cdot n \cdot B_{Reac} \cdot G \cdot A5 - 3 \cdot R \cdot A7}{4} + \\ & + \frac{B \cdot (n \cdot B_{Reac} \cdot R - G \cdot X) + 3 \cdot n \cdot B_{Reac} \cdot G \cdot X}{2} + G \cdot U^2 + \\ & + \left(\frac{G \cdot A1}{2} + R \right) \cdot \frac{P^2 + Q^2}{U^2} + \left(\frac{B^2 \cdot A5}{2} - B_{Reac} \cdot n \cdot A1 + 2 \cdot G \cdot R \cdot X (B - B_{Reac} \cdot n) \right) \\ & + 2 \cdot B \cdot X + \frac{B_{Reac}^2 \cdot n^2 \cdot A5}{2} - \frac{G \cdot (G \cdot A1 + 4 \cdot R)}{2} \cdot P + \\ & + \left(G \cdot X - B \cdot R - \frac{B_{Reac} \cdot n \cdot G \cdot A - B \cdot G \cdot A5}{2} + B_{Reac} \cdot n \cdot R \right) \cdot Q, \end{aligned} \quad (2)$$

де n – кількість встановлених груп ШР; $B_{Reac} \in [0; 6 \cdot 10^{-4}]$ См – діапазон змін провідності встановленого КШР. Для зручності перетворень було введено додаткові коефіцієнти $A5 = R^2 - X^2$, $A6 = X^2 - R^2$, $A7 = n^2 \cdot B_{Reac}^2 + G^2$.



а) ЛЕП без пристроїв компенсації зарядної потужності

б) ЛЕП з встановленим КШР

Рис. 1 Подання повітряної лінії чотириполусником

Залежно від ступеня компенсації значення втрат активної потужності суттєво змінюються, як показано на рис. 2. Для ілюстрування додаткової зміни в системі втрат активної потужності ΔP , внаслідок поперечної компенсації ЛЕП НВН було виконано числовий експеримент за таких характеристик: $l = 400$ км – довжина лінії, $U = 750$ кВ – номінальна напруга лінії. Усереднені погонні параметри ЛЕП 750 кВ з конструкцією фази проводу 4хАС-400/93: $r_0 = 0.019$ Ом/км; $x_0 = 0.289$ Ом/км; $g_0 = 0.0325$ мкСм/км; $b_0 = 4.13$ мкСм/км.

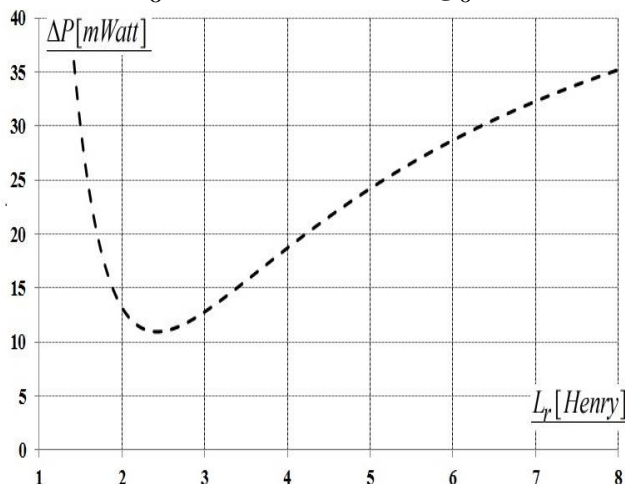


Рис. 2 Зниження сумарних втрат активної потужності у разі застосування КШР

Для оцінювання ефективності використання КШР порівняно зі звичайними ШР було проведено розрахунки втрат активної потужності у трьох характерних режимах роботи ЛЕП НВН: мінімальному навантаженні, максимальному навантаженні та в умовах типової експлуатації. Зміни напруги здійснювалися згідно з установленими нормативними значеннями.

Впровадження КШР дозволяє досягти додаткового зниження технологічних втрат завдяки більш точному вибору необхідної поперечної компенсації реактивної потужності.

Водночас, ключовим чинником економії електроенергії є можливість використання КШР для активного керування поточкорозподілом у неоднорідних

мережах енергосистеми. Це, у свою чергу, сприяє досягненню економічно обґрунтованого та енергетично оптимального усталеного режиму.

Для ілюстрації було розглянуто зміну втрат активної потужності, виконавши аналіз усталеного режиму МЕМ з сімома вузлами (рис. 3). З метою порівняння результатів розрахунку втрат активної потужності за різних умов наведено в табл.3.

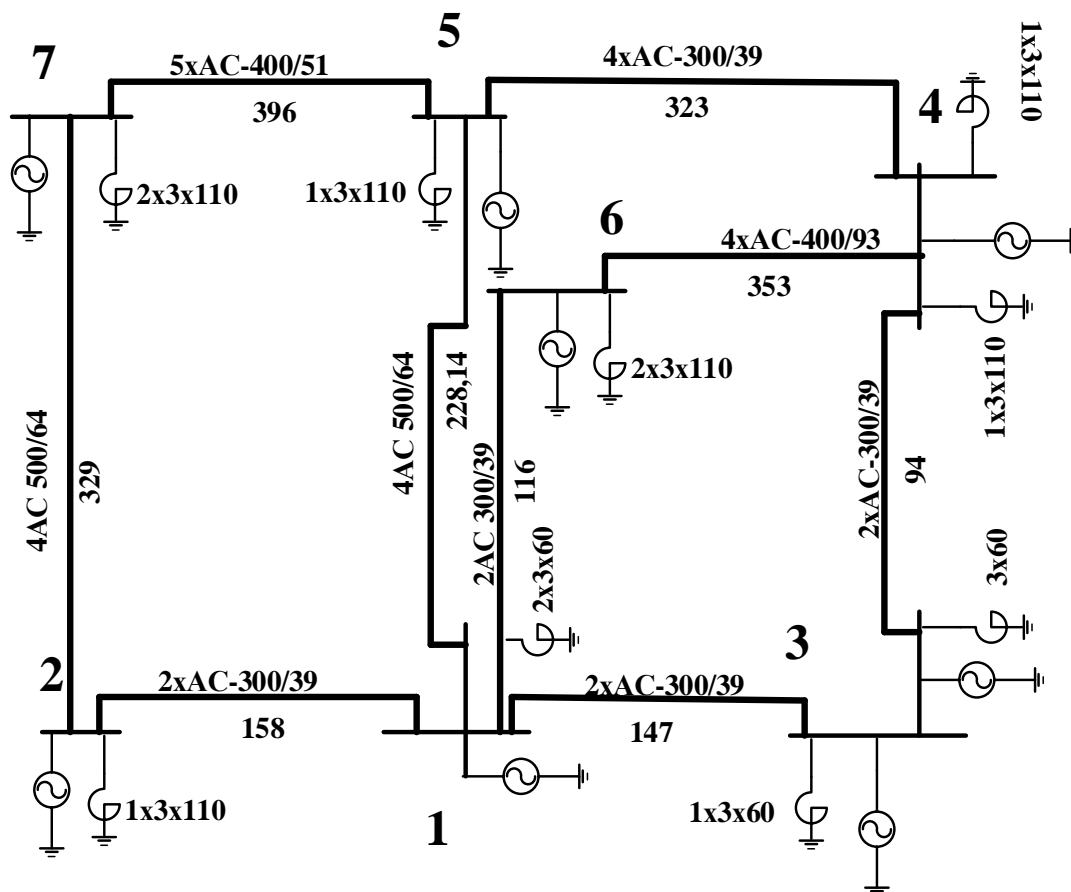


Рис. 3 Схема магістральної електричної мережі 330-750 кВ

Таблиця 3

Втрати активної потужності в тестовій схемі

ЛЕП	Результати розрахунку сумарних втрат активної потужності, МВт		
	Без врахування впливу температури навколишнього середовища	З врахуванням впливу температури навколишнього середовища	Природний режим з врахуванням коронування проводів та впливу температури навколишнього середовища
1-2	19,65	21,03	27,77
1-3	14,98	15,93	24,07
1-6	15,85	16,96	25,14
1-5	36,05	38,57	48,38
3-4	17,88	19,13	29,61

4-6	28,78	30,79	55,29
5-4	29,58	31,65	58,02
5-7	37,59	40,22	65,58
7-2	48,79	52,20	78,99
Σ	249,15	266,58	412,85

Для контролю значень напруги у проміжних точках ЛЕП НВН схеми (рис. 3) визначено залежність $U_{\text{КШР}} = f(P_0)$ напруги КШР $U_{\text{КШР}}$ від переданої потужності лінією P_0 . При вирішенні задачі прийнято, що напруга U_1 та напруга U_2 підтримуються постійними та рівними номінальному значенню. Рівні напруги в проміжних точках ЛЕП НВН вважаються допустимими, якщо їх максимальне значення не перевищує найбільшої робочої напруги, що дорівнює $1.05U_{\text{ном}}$. Для прикладу розглянемо режим лінії 2-5-7 в схемі рис. 3 зі встановленим у вузлі 5 КШР (рис.4).

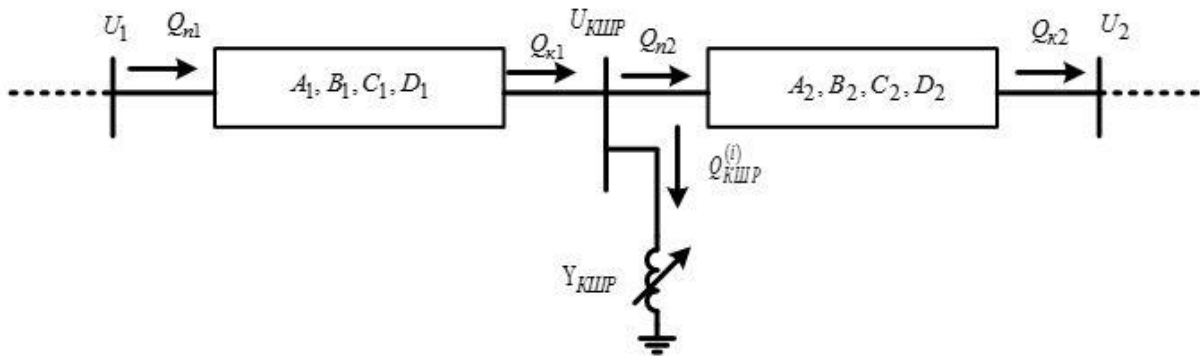


Рис. 4 Лінія електропередавання зі встановленим КШР

Значення $U_{\text{КШР}}$ можна визначити ітераційним методом за алгоритмом :

1. Задається початкове значення $U_{\text{КШР}(0)}$.
2. З виразу

$$P_0 = U_1^2 \frac{|D_{11}|}{|B_{11}|} \cos(\psi_{B11} - \psi_{D11}) - \frac{U_1 U_{\text{КШР}(0)}}{|B_{11}|} \cos(\psi_{B11} + \delta_{\text{двл}}), \quad (3)$$

де $\psi_{A11} = \arg(A_{11})$; $\psi_{B11} = \arg(B_{11})$; $\psi_{C11} = \arg(C_{11})$.

Визначається кут між векторами напруги першої ЛЕП $d_{\text{ЛЕП}}$, реактивна потужність на початку ЛЕП Q_{11} , активна та реактивна потужності в кінці ЛЕП P_{K1}, Q_{K1} :

$$d_{\text{ЛЕП}} = \arccos\left(\frac{U_1^2 \frac{|D_{11}|}{|B_{11}|} \cos(\psi_{B11} - \psi_{D11}) - P_0}{U_1 U_{\text{КШР}(0)}}\right) - \psi_{B11}; \quad (4)$$

$$Q_{П1} = U_1^2 \frac{|D_{11}|}{|B_{11}|} \sin(\psi_{B11} - \psi_{D11}) - \frac{U_1 U_{КШР(0)}}{|B_{11}|} \sin(\psi_{B11} + d_{1ЛЕП}); \quad (5)$$

$$P_{K1} = -U_{КШР(0)}^2 \frac{|A_{11}|}{|B_{11}|} \cos(\psi_{B11} - \psi_{A11}) + \frac{U_1 U_{КШР(0)}}{|B_{11}|} \cos(\psi_{B11} - d_{1ЛЕП}); \quad (6)$$

$$Q_{K1} = -U_{КШР(0)}^2 \frac{|A_{11}|}{|B_{11}|} \sin(\psi_{B11} - \psi_{A11}) + \frac{U_1 U_{КШР(0)}}{|B_{11}|} \sin(\psi_{B11} - d_{1ЛЕП}). \quad (7)$$

Розподіл напруги вздовж першої ЛЕП НВН (рис. 3):

$$U_{1ЛЕП}(l) = U_{КШР(0)} \left| \frac{(P_{ЛЕП1} - jQ_{ЛЕП1}) \operatorname{sh}(\gamma_{01} l_1)}{U_{КШР(0)}^2} + \operatorname{ch}(\gamma_{01} l_1) \right| + \frac{Z_{ЛЕП}}{U_{КШР(0)}}. \quad (8)$$

3. Визначається відстань від кінця ЛЕП до точки з максимальним значенням напруги $l_{екстр}$ з $\frac{d}{dl} U_{1ЛЕП}(l) = 0$.

$$4. U_{1ЛЕП}(l_{екстр}) = U_{МАХ1ЛЕП}.$$

5. Аналогічним чином розраховуються режим другої ЛЕП НВН і визначається $U_{МАХ2ЛЕП}, l_{екстр}$.

6. З двох значень $U_{МАХ2ЛЕП}$ та $U_{МАХ1ЛЕП}$ обирається більше $U_{МАХ}$ і порівнюється з заданим значенням $1,05U_{ном}$.

7. Якщо $U_{МАХ} \neq 1,05U_{ном}$ та $U_{КШРi} < U_{ном}$, то визначено відповідне значення $U_{КШРi}$.

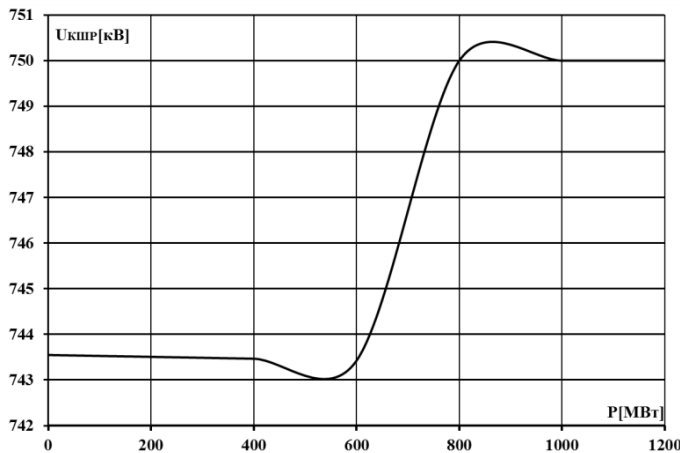


Рис. 5. Графік зміни напруги КШР в залежності від переданої потужності лінією. включно з кроком 50 МВт.

Епюра напруги для досліджуваної ЛЕП наведена на рис. 5.

Якщо значення $U_{МАХ} = 1,05U_{ном}$ та $U_{КШР} = 1,05U_{ном}$, то напруга на КШР підтримується постійною і становить $U_{ном}$.

У випадку $U_{МАХ} > 1,05U_{ном}$ значення $U_{КШР}$ приймається рівним номінальному.

Обчислення $U_{КШРi}$ проводять для кожного P_{0i} , змінюючи в межах від 0 до 2200 МВт

З аналізу епюри на рис.5 видно, що для режиму, за якого потужність, що передається, становить $P_0 = 800$ МВт, максимально допустиме значення $U_{КШР}$ стає рівним $U_{ном} = 750$ кВ, а під час подальшого збільшення P_0 напруга на КШР підтримується постійною і дорівнює $U_{ном}$.

В Табл. 4 наведені результати аналізу втрат активної потужності усталених режимів для наступної схеми МЕМ на (рис. 3) з урахуванням компенсації реактивної потужності.

Таблиця 4

Втрати активної потужності в схемі рис. 3 внаслідок оптимізації

ЛЕП	Результати розрахунку сумарних втрат активної потужності , МВт	
	Природній режим з врахуванням коронування проводів та впливу температури навколишнього середовища	Оптимальний режим після встановлення КШР
1-2	27,77	23,58
1-3	24,07	22,01
1-6	25,14	19,89
1-5	48,38	42,15
3-4	29,61	26,75
4-5	55,29	51,28
4-6	58,02	53,18
5-7	65,58	63,48
7-2	78,99	75,89
Σ	412,85	378.21

У третьому розділі обґрунтовані схеми транспозиції проводів повітряних ЛЕП МЕМ на основі запропонованого підходу до визначення коефіцієнтів несиметрії напруги по зворотній послідовності а також розроблено метод визначення індуктивності СТАТКОМ для притлумлення струму дуги підживлення короткого замикання (КЗ). На сьогоднішній день тривалість «безструмової» паузи ОАПВ ЛЕП вибирається з умов забезпечення гасіння вторинної дуги і подальшої деіонізації дугового проміжку за найтяжчих умов. Але реальний час гасіння дуги в сучасних електричних мережах зазвичай набагато (в 2-10 разів) менше ніж те значення, яке обирають на основі узагальнених експериментальних кривих. Так, для ЛЕП 750 кВ приймають тривалість циклу ОАПВ 1,0-1,5 с, хоча в переважній більшості випадків безструмова пауза ОАПВ може бути значно меншою. З іншого боку, вибрані витримки часу не виключають неуспішних повторних включень у випадку стійкого характеру пошкодження.

Усунення відмінностей між значеннями параметрів фаз ЛЕП на одному кроці транспозиції не діє протягом всього циклу, оскільки на кожному із кроків

транспозиції фази ЛЕП знаходяться в різних умовах. Еквівалентні параметри фаз лінії для кожного циклу в загальному випадку будуть різними. Чим більша довжина ЛЕП і вище значення її номінальної напруги, тим більша несиметрія від пофазної відмінності параметрів, що вносить суттєві неточності у розрахунках необхідного значення опору СТАТКОМ для компенсації повторної дуги підживлення КЗ. Отже, схеми транспозиції ЛЕП НВН необхідно обирати не тільки, виходячи із забезпечення допустимого рівня несиметрії в нормальному режимі, але й для створення умов для успішного гасіння дуги підживлення та ліквідування резонансних перенапруг під час ліквідації однофазних дугових замикань під дією ОАПВ.

На рис.6 наведено схеми взаємного розташування фаз в магістральних ЛЕП.

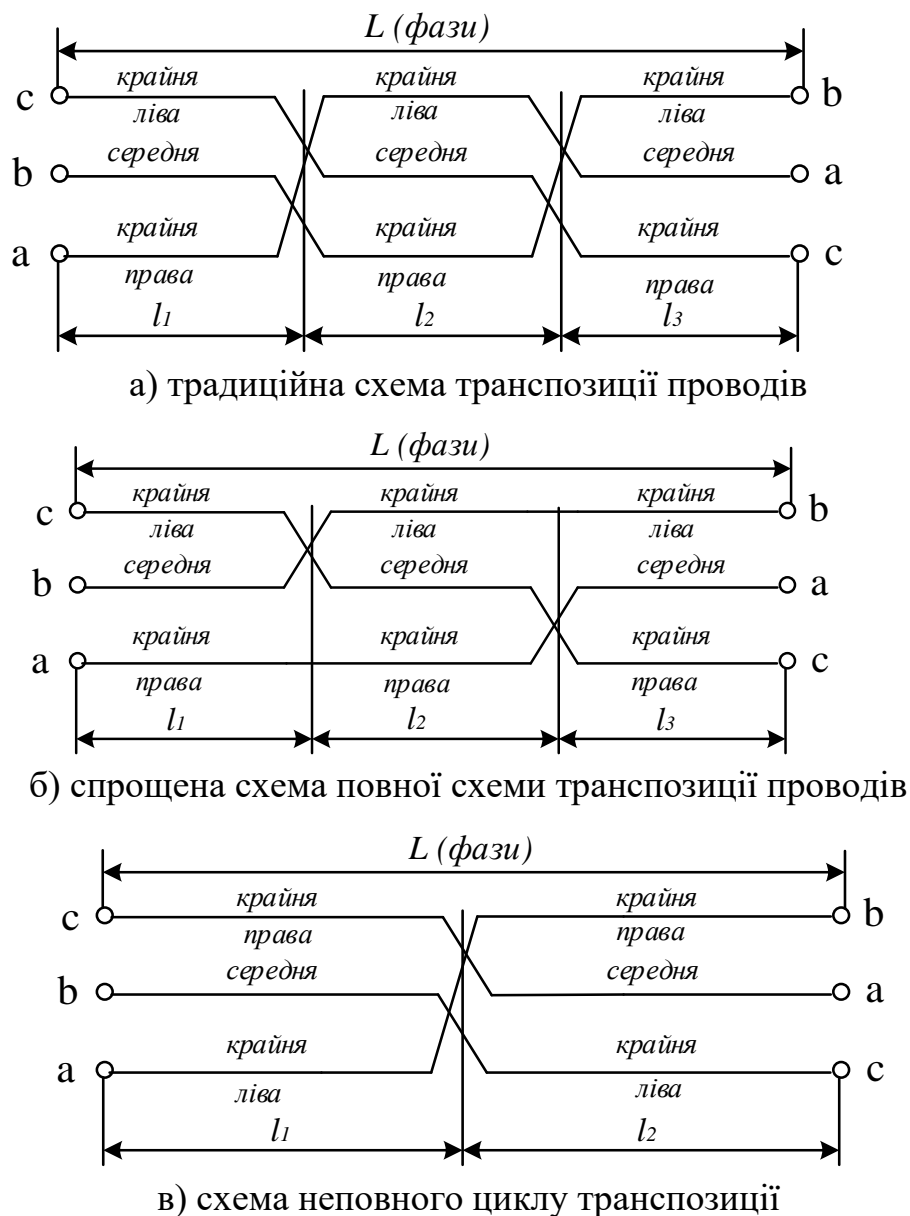


Рис. 6. Схеми транспозиції магістральних ЛЕП

Досліджено вплив пофазної несиметрії на визначення індуктивного опору для гасіння вторинної дуги струму короткого замикання. Вираз для струму в трифазній ЛЕП НВН можна записати у вигляді:

$$\begin{bmatrix} I_{Aa} \\ I_{Ab} \\ I_{Ac} \end{bmatrix} = j\omega l \begin{bmatrix} C_A & C_M & C_M \\ C_M & C_B & C_M \\ C_M & C_M & C_C \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix}, \quad (9)$$

де I_{Aa}, I_{Ba}, I_{Ca} – струми фаз лінії; C_M – міжфазні ємності; C_A, C_B, C_C – ємності між фазою та землею; V_A, V_B, V_C – фазні напруги лінії.

Наприклад, якщо на фазі А відбулось КЗ, а вимикачі пошкодженої фази знаходяться у розімкненому стані, то, використовуючи вираз (9), можна розрахувати ємнісний струм фази А, яка отримує підживлення місця КЗ від двох непошкоджених фаз:

$$I_{Aa} = j\omega |C| (V_B + V_C). \quad (10)$$

У випадку застосування повної схеми транспозиції (рис. 6 а), матриця ємностей C набуває вигляду:

$$C = l_1 N_{T1} \begin{bmatrix} C_A & C_{AB} & C_{AC} \\ C_{BA} & C_B & C_{BC} \\ C_{CA} & C_{CB} & C_C \end{bmatrix} \cdot l_2 N_{T2} \begin{bmatrix} C_A & C_{AB} & C_{AC} \\ C_{BA} & C_B & C_{BC} \\ C_{CA} & C_{CB} & C_C \end{bmatrix} \cdot l_3 N_{T1} \begin{bmatrix} C_A & C_{AB} & C_{AC} \\ C_{BA} & C_B & C_{BC} \\ C_{CA} & C_{CB} & C_C \end{bmatrix}, \quad (11)$$

де l_1, l_2, l_3 – довжини фактичних кроків транспозиції, $C_{AB}, C_{BA}, C_{BC}, C_{CB}, C_{AC}, C_{CA}$ – міжфазні ємності.

Очевидно, що значення такого струму (10) визначається ємністю C (11). Головною метою визначення індуктивного опору є розлагодження резонансного паралельного контура, який утворюється ємностями ЛЕП та індуктивностями ШР. Інакше кажучи, міжфазний індуктивний струм, що генерується шунтувальним реактором, підключеним за схемою чотирипроменевої зірки, має мати таке саме значення, як і ємнісний струм, але з протилежним знаком. Необхідний струм реактора можна отримати із виразу:

$$\begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix} = -j \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_{I0}^{-1} & 0 & 0 \\ 0 & X_{II}^{-1} & 0 \\ 0 & 0 & X_{I2}^{-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix}, \quad (12)$$

де $X_{I0}^{-1}, X_{II}^{-1}, X_{I2}^{-1}$ – провідність ШР нульової, прямої та зворотної послідовності.

Провідність ШР прямої послідовності: $X_{II}^{-1} = X_{I2}^{-1}$.

Провідність ШР нульової послідовності: $X_{I0}^{-1} = (X_{II} + 3X_n)^{-1}$,

де X_n – опір статичного синхронного компенсатора.

Індуктивні складові фазних струмів із виразу (12) матимуть вигляд:

$$\begin{bmatrix} I_{AL} \\ I_{BL} \\ I_{CL} \end{bmatrix} = -j \begin{bmatrix} \alpha_s & \beta_m & \beta_m \\ \beta_m & \alpha_s & \beta_m \\ \beta_m & \beta_m & \alpha_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix}, \quad (13)$$

де $\alpha_s = (X_{I0}^{-1} + 2X_{II}^{-1})/3$; $\beta_m = (X_{I0}^{-1} - X_{II}^{-1})/3$.

Повний струм повторної дуги підживлення КЗ:

$$I_D = j(V_B + V_C)(\omega|C_M| - \beta_M). \quad (14)$$

Для того, щоб для ЛЕП НВН сума векторів ємнісних та індуктивних струмів дорівнювала нулю (чи наближалась до нуля) $\overline{I_{CL}} + \overline{I_{AL}} = 0$, необхідно, щоб індуктивна провідність дорівнювала ємнісній провідності і становила $(X_{10}^{-1} - X_{11}^{-1})/3 = \omega C$. У цьому разі буде спостерігатись точне налаштування контуру, утвореного ємностями (11) та індуктивностями КШР та СТАТКОМ, а для того, щоб запобігти резонансному підвищенню напруги та сприяти зниженню струму дуги КЗ необхідне виконання умови:

$$X_n = (\omega|C| + \frac{1}{X_{1L}})^{-1} - X_{1L}. \quad (15)$$

Таким чином, окрім компенсування ємнісної складової струму дуги підживлення КЗ, СТАТКОМ виконує ще одну функцію – запобігає появі резонансних перенапруг. Результати порівняння розрахунку опору СТАТКОМ із врахуванням та без урахування транспозиції проводів наведено в табл. 5.

Таблиця 5

Значення опорів СТАТКОМ X_n (Ом) у разі зміни схеми транспозиції

$l_{\text{ЛЕП, км}}$	Фактична схема транспозиції	Повний цикл транспозиції (рис. 6 а)	Спрощена схема повного циклу транспозиції (рис. 6 б)	Неповний цикл транспозиції (рис. 6 в)	Без транспозиції проводів
180	105	115	115	119	158,95
280	204	232	232	258	-
460	290	360	360	-	-

Запропонований в роботі керований пристрій ОАПВ (КОАПВ) є більш ефективним в порівнянні із традиційними засобами компенсації струму підживлення дуги, які використовують дискретну зміну параметрів елементів компенсуючих пристроїв, оскільки в КОАПВ передбачено використання плавно регульованих елементів. Це дозволяє забезпечити точне компенсування ємнісної складової струму дуги підживлення КЗ. Так для ЛЕП довжиною 300-400 км використання КОАПВ зменшує струм дуги підживлення в 1,6-1,8 рази і тим самим дозволяє скоротити безструмову паузу. Принципову схему КОАПВ з блоком визначення місця пошкодження (ВМП) показано на рис. 7.

Керування відновлюваною напругою в циклі безструмової паузи ОАПВ (завдяки перекомпенсації фазної ємності відключеної фази) одночасно дозволяє мінімізувати діюче значення напруги у разі повторного включення аварійної фази, що значно підвищує надійність відновлення повнофазного режиму роботи ЛЕП.

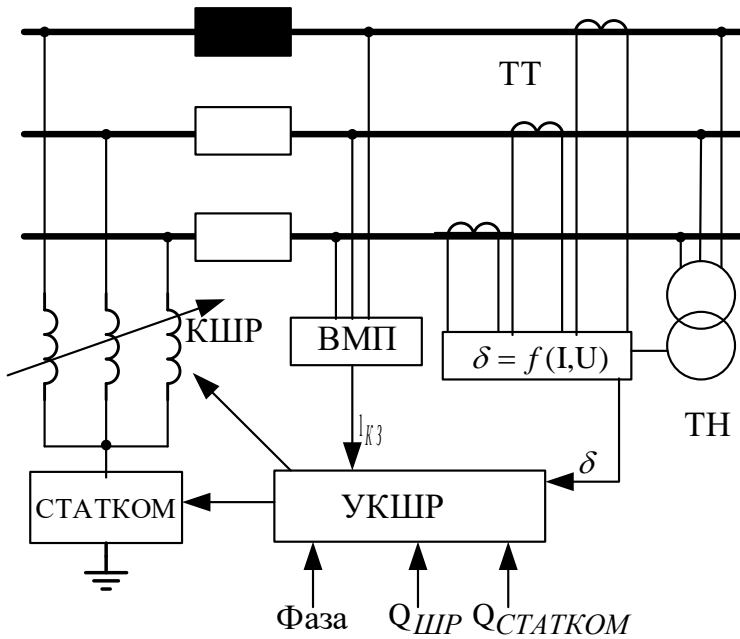


Рис. 7 Принципова схема КОАПВ

Розроблене КОАПВ із визначенням в циклі безструмової паузи ОАПВ струму підживлення дуги і необхідного часу безструмової паузи. На рис. 8 показано блок-схему КОАПВ, на якій: $Q_{ШР}$ – потужність ШР; $Q_{СТАТКОМ}$ – потужність СТАТКОМ; $l_{КЗ}$ – відстань від місця КЗ; δ – кут між вимірними значеннями струму та напруги трансформатором напруги (ТН) та трансформатором струму (ТС); t_2 – час горіння дуги

підживлення КЗ; $t_{ОАПВ}$ – тривалість циклу ОАПВ.

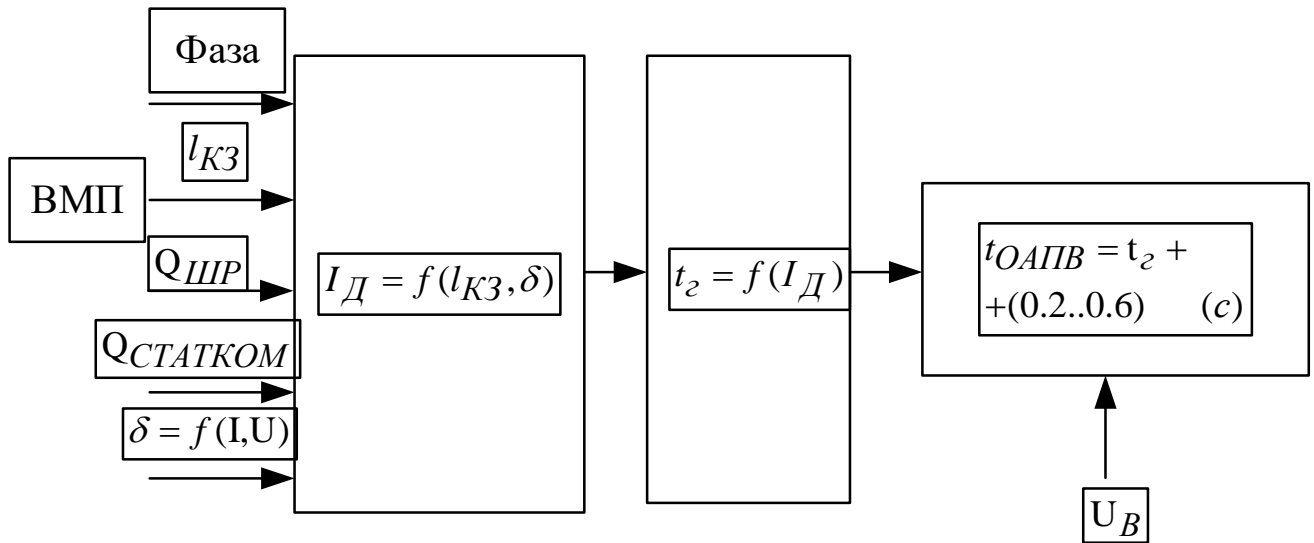


Рис.8 Блок-схема КОАПВ

Зазначений засіб практично не має зон нечутливості і може використовуватися як самостійно, так і в комбінації з традиційним ОАПВ. Взагалі функції КОАПВ повністю та надійно реалізуються за умови перекомпенсації індуктивністю ємнісного опору відключеної фази ЛЕП.

Четвертий розділ присвячено вирішенню задачі зменшення несиметрії МЕМ керованими пристроями компенсації реактивної потужності.

Крім неприпустимих рівнів напруг проблемою, яка виникає в умовах неповнофазної роботи АТ, є несиметрія струмів і напруг в електричних мережах. Тому в умовах неповнофазної роботи також необхідно контролювати несиметрію струму та напруги, тобто коефіцієнти несиметрії нульової та зворотної послідовностей. Еквівалент розрахункової схем наведено на рис. 9.

Співвідношення між фазними напругами та струмами в ЛЕП визначається співвідношеннями

$$\begin{aligned} E_{oP} &= A_P E_{nP} + B_P I_{nP} \\ I_{oP} &= C_P E_{nP} + D_P I_{nP} \end{aligned} \quad (16)$$

де $E_{nP} = E_n \begin{vmatrix} 1 \\ a^2 \\ a \end{vmatrix}$, $E_{oP} = E_0 \begin{vmatrix} 1 \\ a^2 \\ a \end{vmatrix}$, $I_{oP} = \begin{vmatrix} I_{0a} \\ I_{0b} \\ I_{0c} \end{vmatrix}$, $I_{nP} = \begin{vmatrix} I_{na} \\ I_{nb} \\ I_{nc} \end{vmatrix}$ – вектор-стовпці ЕРС і

струмів на кінцях електропередачі. E_{nP} , E_{oP} , – значення кінцевої ЕРС, що відповідає фазі А. Рішення рівнянь відносно фазних струмів генератора:

$$I_{oP} = C_a E_{nP} + D_P [B_P^{-1} E_{oP} - B_P^{-1} A_P E_{nP}] \quad (17)$$

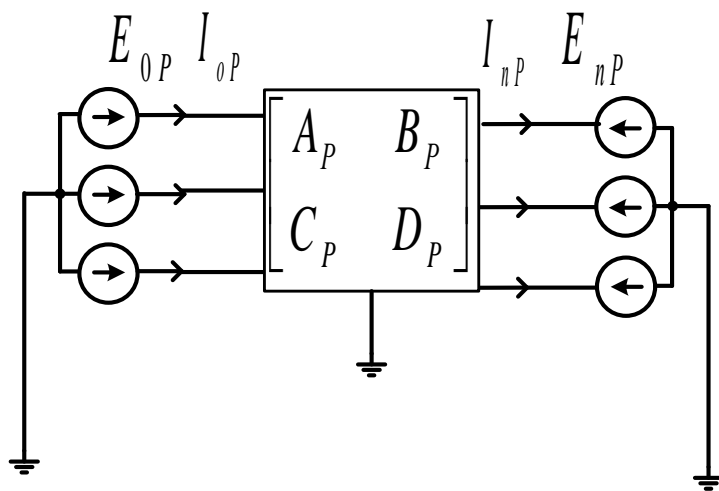


Рис. 9 Еквівалент розрахункової схеми

В якості критеріїв розглядається генераторний струм станції та напруга на шинах високовольтного розподільного пристрою.

Водночас несиметрія струму характеризується коефіцієнтами несиметрії зворотної та нульової послідовностей:

$$k_{i2} = \frac{I_{G2}}{I_{G1}}, \quad k_{i0} = \frac{I_{G0}}{I_{G1}}, \quad (18)$$

де I_{G1} , I_{G2} , I_{G0} – генераторні струми прямої, зворотної та нульової послідовностей відповідно. Відповідно, несиметрія напруги визначається коефіцієнтами несиметрії зворотної і нульової послідовності:

$$k_{U2} = \frac{U_{SG2}}{U_{SG1}}, \quad k_{U0} = \frac{U_{SG0}}{U_{SG1}}, \quad (19)$$

де U_{SG1} , U_{SG2} , U_{SG0} – напруга на шинах розподільного пристрою відповідно прямої, зворотної та нульової послідовностей.

На рис.10 наведено результати аналізу неповнофазного режиму роботи двох груп однофазних АТ 750/330/15,75 кВ (пунктиром показано АТ з від'єднаною фазою). Переведення АТ в неповнофазний стан призводить до істотних змін струмів у фазах.

Неповнофазний режим роботи АТ відрізняється від типового несиметричного режиму впливом несиметрії на обладнання: найбільші за значенням струми зворотної та нульової послідовностей замикаються всередині контуру паралельно включених трифазних та двофазних АТ.

Вектори струмів I_2 та I_0 у трифазній групі знаходяться у фазі зі струмами прямої послідовності I_1 . Це призводить до збільшення струму у фазі А трифазної групи в порівнянні з струмами в інших фазах. Зазначимо також, що

вектори струмів I_2 та I_0 у двофазній групі АТ знаходяться у протифазі зі струмами I_2 та I_0 трифазної групи АТ.

Струм у фазі А (однойменної до від'єднаної фази неповнофазної групи АТ) менший, ніж сума струмів прямої послідовності всіх фаз, що залишилися в роботі груп АТ, що і спричинить перевантаження обмоток однофазних АТ.

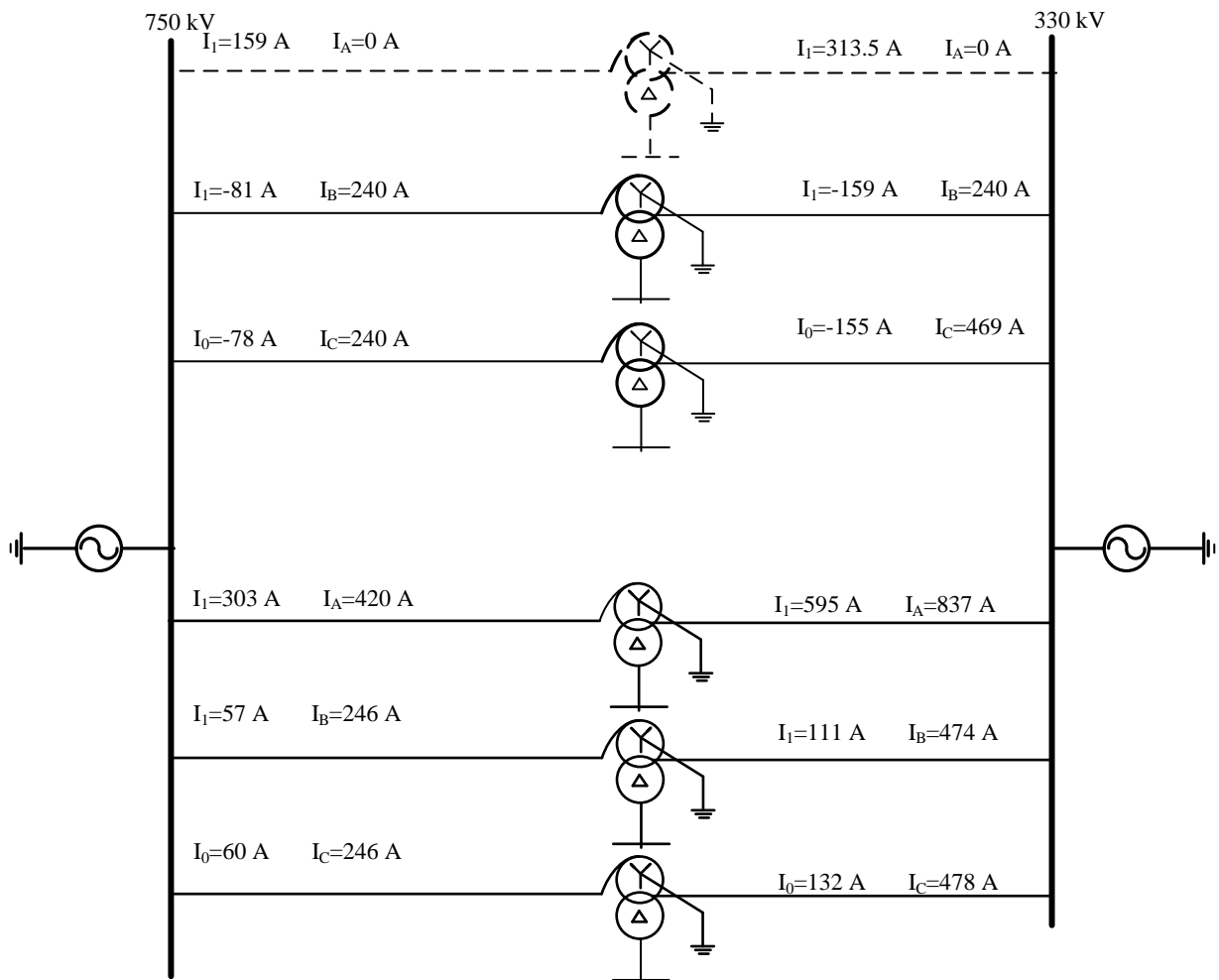


Рис. 10 Розподіл струмів в умовах неповнофазного режиму роботи групи однофазних АТ

Потужність прямої послідовності, що передається через АТ в умовах неповнофазного режиму, визначається виразом:

$$S_1 = 3U_1 \sum_{i=1}^N I_1^i, \quad (20)$$

де $\sum_{i=1}^N I_1^i$ – сума струмів прямої послідовності груп АТ.

Порівняємо потужність (20) з потужністю, яка передається за повнофазною схемою АТ:

$$S = 3U_p I_p, \quad (21)$$

де U_p і I_p – значення фазних напруг і струмів у симетричному режимі.

Додаткова потужність, яка може бути передана в умовах неповнофазної паралельної роботи груп АТ без перевантаження фази А:

$$\Delta S = S \left(1 - \frac{I_A}{\sum_{i=1}^N I_1^i} \right), \quad (22)$$

де S_{nom} – номінальна потужність групи з трьох однофазних АТ; I_A – струм фази А однойменної до від'єднаної фази неповнофазної групи АТ.

Значення ΔS (22) залежить від потужності систем, що примикають до неповнофазної групи АТ. Відносне середнє значення K сумарних опорів зворотної та нульової послідовностей суміжних систем:

$$K = \frac{0.5 \left(\sum_{i=1}^n (X_i^{(1)} + X_i^{(0)}) \right)}{X_{0L1}}, \quad (23)$$

де X_{0L1} – індуктивний опір першої ПЛ; $X_i^{(1)}$, $X_i^{(0)}$ – опори зворотної та нульової послідовностей суміжних систем.

Залежність додаткової потужності (22) від сумарних значень опорів зворотної та нульової послідовностей (всі опори приведені до однієї з напруг АТ) суміжних систем наведено на рис. 11.

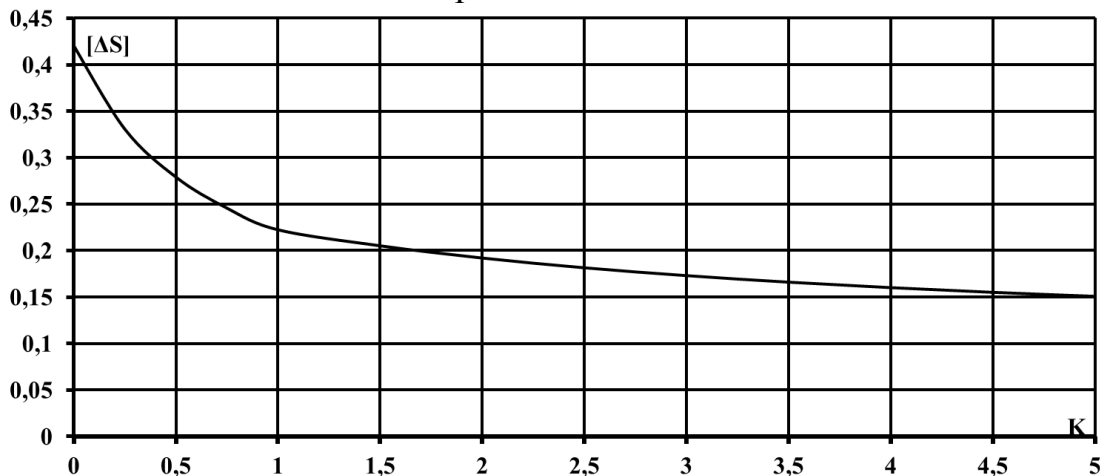


Рис. 11 Залежність ΔS від середнього значення суми опорів зворотної та нульової послідовностей суміжних систем

Як видно з рис. 11, максимальне значення додаткової потужності спостерігається за умови приєднання неповнофазної групи АТ до потужних суміжних енергосистем. Оскільки така умова виконується не завжди, тому необхідно використання спеціальних симетрувальних засобів, які спрямовані на зменшення струмів зворотної та нульової послідовностей у трифазній групі АТ, в наслідок чого зменшиться і струми в робочих фазах неповнофазної групи АТ.

У п'ятому розділі наведено опис розробленого методу визначення часових інтервалів процесу керованого вимкнення ЕВ, що забезпечує досягнення аперіодичними складовими фазних струмів нормативних значень у разі збереження послідовності фаз на момент набування миттєвими значеннями струму нульових значень.

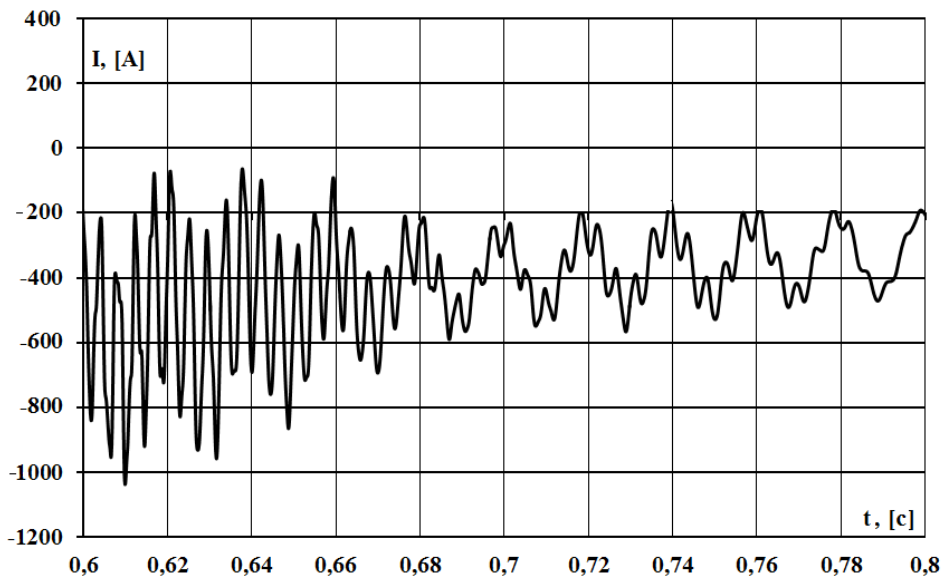


Рис. 12 Повний струм електромагнітного перехідного процесу

На рис. 12 показано повний струм електромагнітного перехідного процесу в непошкодженій фазі повторного ввімкнення трифазного АПВ. Як відомо, аперіодична складова струму визначає момент переходу струму через нуль, тому відповідно, чим більше ця складова струму перехідного процесу, тим довше дуга буде горіти в дуговій камері, що призведе до пошкодження полюса вимикача.

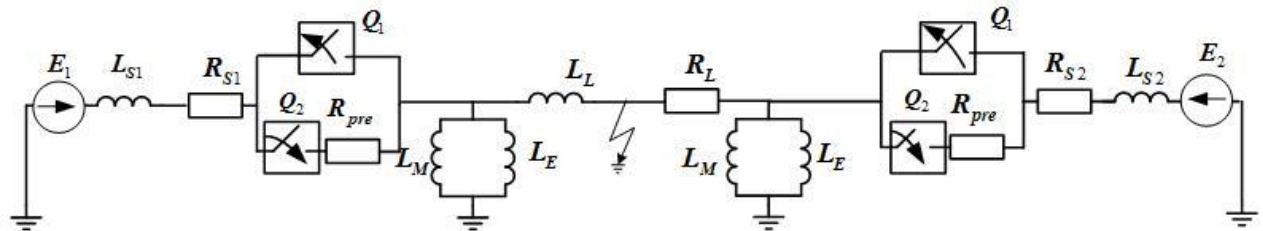
В сучасних електричних мережах відбувається широке впровадження елегазової комутаційної апаратури. Але вже набутий досвід її експлуатації свідчить, що слід враховувати особливі умови роботи ЕВ на ЛЕП з шунтувальними реакторами, які пов'язані з притлумленням аперіодичної складової струму перехідного процесу. У разі перевищення гранично допустимих значень аперіодична складова струму може зумовити тривалу відсутність переходу струму через нуль, що призводить до подовження часу горіння дуги в дугогасній камері елегазового вимикача. Це є неприпустимим для розповсюджених ЕВ з автокомпресійним принципом гасіння, за якого інтенсивність горіння дуги визначається постійною часу затухання та амплітудою аперіодичної складової струму у струмі кола, що замикається.

Амплітуда і стала загасання аперіодичної складової у струмі, визначаються співвідношенням еквівалентних активного і реактивного опору $\tau = L_{\Sigma} / R_{\Sigma}$. Співвідношення $\tau = L_{\Sigma} / R_{\Sigma}$ залежить від параметрів лінії, кількості включених ШР, опору системи, наявності резистивних елементів. Чим більше співвідношення $\tau = L_{\Sigma} / R_{\Sigma}$, тим менше амплітуда аперіодичної складової та більше (по модулю) коефіцієнт загасання. Вплив фази напруги на контактах вимикача в момент включення полягає в тому, що у разі включення поблизу нуля синусоїди напруги амплітуда аперіодичної складової найбільша, у разі включення поблизу максимуму синусоїди напруги – найменша.

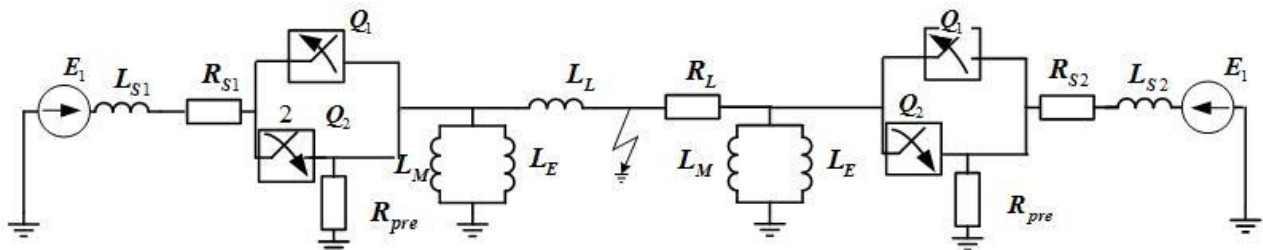
Загалом для запобігання небезпечним значенням параметрів режиму ЛЕП НВН можуть застосовуватися такі технічні засоби та спеціальні організаційні заходи, що ілюструє рис. 13, де зображено заступну схему фази ЛЕП НВН, на якій виникло КЗ (зв'язок такої ЛЕП з енергосистемою подано зображенням ЕРС E_1 та

E_2), а саме:

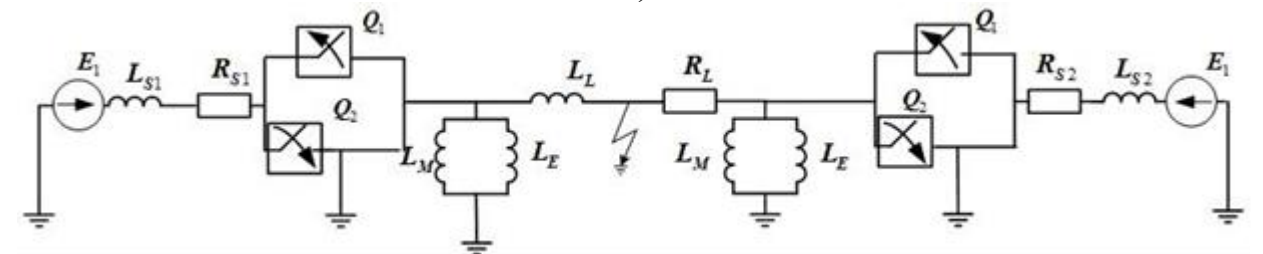
- використання передувімкнених активних опорів в ЕВ, які можуть бути підключені послідовно або паралельно відносно ЕВ (рис.13 а і б);
- застосування автоматичного шунтування фаз, коли відключена фаза шунтується автоматичними вимикачами (рис. 13 в);
- керована комутація (КК) – для комутації у визначений момент за умовами мінімального значення постійної часу згасання аперіодичної складової струму (рис. 13 г).
- відключення груп ШР, а також використання неповнофазних режимів груп ШР (рис. 13 д).



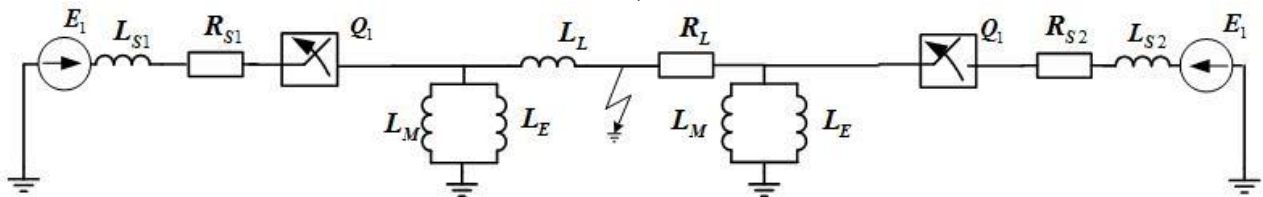
а)



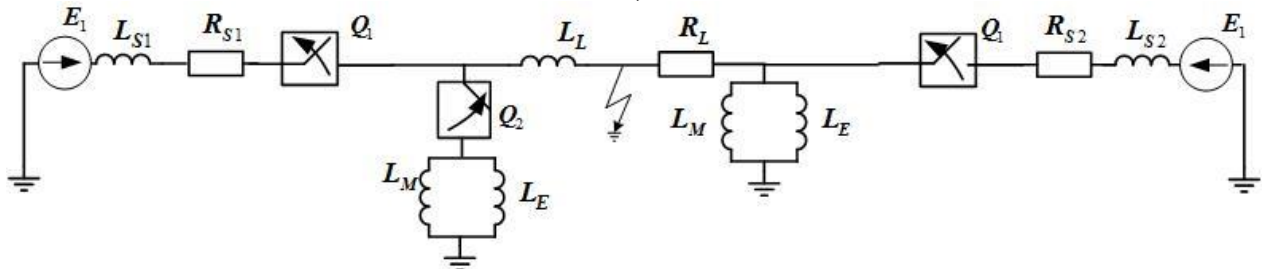
б)



в)



г)



д)

Рис. 13 Засоби та заходи із запобігання небезпечним значенням параметрів режиму ЛЕП НВН під час комутацій

На рис. 13 також позначено: L_M , L_E – індуктивності ШР, що компенсують відповідно ємність між фазами та ємність між фазою та землею; L_L , R_L – індуктивність та активний опір фази ЛЕП; L_{S1} , L_{S2} , R_{S1} , R_{S2} – еквівалентна індуктивність та активний опір систем 1,2 відповідно; R_{pre} – активний опір передувімкненого резистора ЕВ. На рис. 13а та 13б Q1 визначено основний ЕВ, а Q2 позначено допоміжний вимикач передувімкненого активного опору, контакти якого замкнені для зменшення впливу аперіодичної складової струму. На рис. 13в Q1 позначено розімкнуті основні контакти вимикача ЕВ, а Q2 – допоміжні контакти автоматичного пристрою шунтування фаз. На рис. 13д Q1 позначено вимикач з пристроєм КК, який забезпечує включення в визначений момент, а Q2 – вимикач ШР.

Стала часу згасання аперіодичної складової струму у випадку застосування передувімкненого активного опору, підключеного послідовно з вимикачем, матиме вигляд:

$$\tau = \frac{AB(R_{pre}^2(2M+I)+2R_{pre}A+2R_{pre}(FR_{S1}+GR_{S2}))}{C(R_{pre}+R_{S1})(R_{pre}+R_{S2})(AK+L_{S1}L_{S2}(L_L L_M+L_L L_Z+L_Z L_M))}, \quad (24)$$

де $A = L_L L_M L_E$; $B = L_{S1} L_{S2}$; $C = R_L R_M R_E$; $D = R_{S1} R_{S2}$; $E = R_{S1} + R_{S2}$; $F = R_L R_M$; $G = R_L R_E$; $I = R_M R_E$; $K = L_{S1} + L_{S2}$; $M = F + G$.

Стала часу згасання аперіодичної складової струму у випадку застосування передувімкненого активного опору, підключеного паралельно вимикачу можна подати у вигляді:

$$\tau = \frac{AB(R_{pre-ins} CE+RD(2F+I)+2CD)}{R_{pre-ins} CD(A(L_{S1}+L_{S2})+L_{S1}L_{S2}(2L_L L_M+2L_L L_Z+L_M L_Z))}. \quad (25)$$

У разі використання пристрою КК стала часу згасання аперіодичної складової струму дорівнюватиме:

$$\tau = \frac{AB(GR_M(R_{S1}+R_{S2})D(2F+2G+I))}{DFR_Z(AK+B(2L_M L_Z+2L_L L_Z+L_M L_Z)(L_{S1}+L_{S2})+L_{S1}L_{S2}(2L_L(L_M+L_Z)+L_M L_Z))}. \quad (26)$$

У разі вимкнення групи ШР зазначену вище сталу часу можна записати у вигляді:

$$\tau = \frac{AB(GR_M(R_{S1}+R_{S2})D(F+G+I))}{DFR_Z(AK+B(L_M L_Z+L_L L_Z+L_M L_Z)(L_{S1}+L_{S2})+L_{S1}L_{S2}(L_L L_M+L_L L_Z+L_M L_Z))}. \quad (27)$$

У разі застосування автоматичного шунтування фази стала часу згасання аперіодичної складової струму буде:

$$\tau = \frac{L_{S1}L_{S2}(R_{S1}+R_{S2})}{R_{S1}R_{S2}(L_{S1}+L_{S2})}. \quad (28)$$

Результати впливу реалізації засобів та заходів на сталу часу згасання аперіодичної складової струму ілюструє табл. 6.

Постійна часу згасання аперіодичної складової струму

Засіб та/або захід	Стала часу згасання аперіодичної складової струму τ , [с]	
	ХАЕС (Україна) - Жешув (Польща)	Західноукраїнська (Україна) - Альбертирша (Угорщина))
Без засобів та/або заходів	0.097	0.1
Послідовно з'єднані передувімкнені активні опори	0.055	0.051
Паралельно з'єднані передувімкнені активні опори	0.093	0.098
Автоматичне шунтування фази	0.044	0.048
Вимкнення групи ШР	0.088	0.087
Пристрій КК	0.002	0.0025

Головною метою застосування технічних засобів у процесах комутації ЛЕП НВН є зменшення тривалості та амплітуди аперіодичної складової струму. Як видно з даних експериментів (табл. 6), мінімальне значення сталої часу, що визначає швидкість затухання аперіодичної складової, досягається за умови використання керованої комутації. У випадку використання передувімкнених активних опорів (рис. 13 а та б) спостерігається найбільше значення сталої часу, що, у свою чергу, призводить до подовження перехідного процесу та підвищення навантаження на комутаційне обладнання. Таким чином, керована комутація забезпечує найбільш сприятливі умови для відключення, мінімізуючи негативний вплив аперіодичних складових на процеси в дугогасильних системах елегазових вимикачів. Одночасно застосування керованої комутації є ефективним засобом зменшення динамічних перенавантажень при комутації компенсованих ЛЕП надвисокої напруги.

У шостому розділі запропоновано проводити оцінку впливу залишкового намагнічування осердя АТ для розробки заходів запобігання резонансним перенапругам і зниження значень кидків струмів намагнічування в електричних мережах в несинусоїдальних режимах роботи.

Після відключення АТ деякі магнітні домени зберігають ступінь орієнтації відносно магнітного поля, яке було прикладено до осердя. Це явище відоме як залишкове намагнічування. При відключенні АТ напруга намагнічування дорівнює нулю, струм намагнічення зменшується до нуля, тоді як магнітна індукція змінюється залежно від характеристики намагніченості осердя. Вона визначає наявність залишкової індукції в осерді при відключенні АТ.

Під час комутації АТ, магнітне осердя може перейти в стан насичення, за якого невеликий приріст магнітного потоку через нього викликає різке збільшення струму через обмотку автотрансформатора. У той же час отриманий магнітний потік через магнітне осердя в момент ввімкнення, Φ_{rem} впливає на результуюче значення:

$$\Phi_{rez} = \Phi_{st} + \Phi_{tran} \pm \Phi_{rem}, \quad (29)$$

де Φ_{st} – усталений магнітний потік, Вб; Φ_{tran} – магнітний потік перехідного процесу, Вб; Φ_{rem} – залишковий магнітний потік, Вб.

Використовування пристрою для зняття залишкової намагніченості Φ_{rem} магнітного кола автотрансформатора знижує значення залишкового магнітного потоку до нуля $\Phi_{rem} = 0$, тоді результуючий магнітний потік через магнітопровід у момент вмикання дорівнює:

$$\Phi_{rez} = \Phi_{st} + \Phi_{tran}. \quad (30)$$

Увімкнення трансформатора за методом зменшення пускового струму АТ у той час, коли змінна напруга мережі знаходиться у фазі 90° , після попередньої реалізації способу зняття залишкової намагніченості магнітопроводу, дозволяє отримати результуюче значення магнітного потоку у разі рівним нулю залишкового $\Phi_{rem} = 0$ у момент увімкнення без магнітного потоку перехідного процесу:

$$\Phi_{rez} = \Phi_{tran}. \quad (31)$$

У тому випадку, коли автотрансформатор працює на холостому ході, його вторинна та третинна обмотки розімкнуті, процес перемикання описують рівнянням напруги первинної обмотки. У цьому випадку загальна індуктивність L первинної обмотки дорівнює відношенню потокового зв'язку обмотки до струму, що її викликає, тобто у тому випадку, коли автотрансформатор працює на холостому ході, його вторинна та третинна обмотки розімкнуті, процес увімкнення описано рівнянням напруги первинної обмотки. У рівнянні (29) Φ_{st} первинної обмотки дорівнює відношенню потокового зв'язку обмотки до струму, що її викликає, тобто

$$\Phi_{st} = \Phi_m \sin(\omega t + \psi - \varphi_0), \quad (32)$$

де $\varphi_0 = \arctg(\frac{\omega L}{r})$, L , r – параметри обмоток трансформатора заступної схеми.

Оскільки $\omega L \gg r$, у такому випадку $\varphi_0 = \frac{\pi}{2}$, тоді

$$\Phi_{st} = -\Phi_m \cos(\omega t + \psi). \quad (33)$$

Значення магнітного потоку перехідного процесу матимемо після розв'язання рівняння $\Phi_{tran} = C e^{-t \frac{r}{L}}$.

Константу інтегрування C визначено з початкових умов. На момент увімкнення магнітний потік дорівнює залишковому значенню потоку Φ_{rem} . При $t = 0$:

$$\Phi_{tran} + \Phi_{st} = -\Phi_m \cos \psi + C = \pm \Phi_{rem}. \quad (34)$$

Отже

$$\Phi_{tran} = (\Phi_m \cos \psi \pm \Phi_{rem}) e^{-t \frac{r}{L}}. \quad (35)$$

Підставивши Φ_{st} (33) і Φ_{tran} (35) у формулу (30) отримаємо вираз миттєвого значення потоку.

$$\Phi = \Phi_m \left[\cos \psi e^{-t \frac{r}{L}} - \cos(\omega t + \psi) \right] \pm \Phi_{rem} e^{-t \frac{r}{L}}. \quad (36)$$

Найвище значення потоку досягається, коли АТ вмикається в момент $\psi = 0$, якщо $\omega L \gg r$, тоді потік досягає максимального значення $t = \frac{T}{2} = \frac{\pi}{\omega}$.

У такому випадку

$$e^{-t \frac{r}{L}} \approx 1. \quad (37)$$

Залишковий потік може бути значним, іноді досягаючи половини норми. Якщо припустити, що $\Phi_{rem} = 0,5 \cdot \Phi_m$ тоді максимальне значення потоку з урахуванням (33) дорівнює

$$\Phi_{max} = 2,5 \cdot \Phi_{rem}. \quad (38)$$

Залишкове Φ_{rem} намагнічування магнітного контуру досягає свого максимуму, коли струм і напруга збігаються по фазі, і відповідно до закону електромагнітної індукції потік в осерді Φ_{rem} досягає максимуму й відстає на 90° від струму та напруги. Подальше перемикання на холостий хід трансформатора буде супроводжуватися максимально можливим сплеском струму намагнічування з несприятливою ознакою аперіодичної складової струму перемикання. Під час індуктивного (ємнісного) навантаження АТ Φ_{rem} буде відповідати можливому мінімуму, а за умов ввімкнення навантаження та в режимі короткого замикання максимуму значення не досягає. Анормальні резонансні перенапруги на другій гармонічній складовій показано на рис. 14.

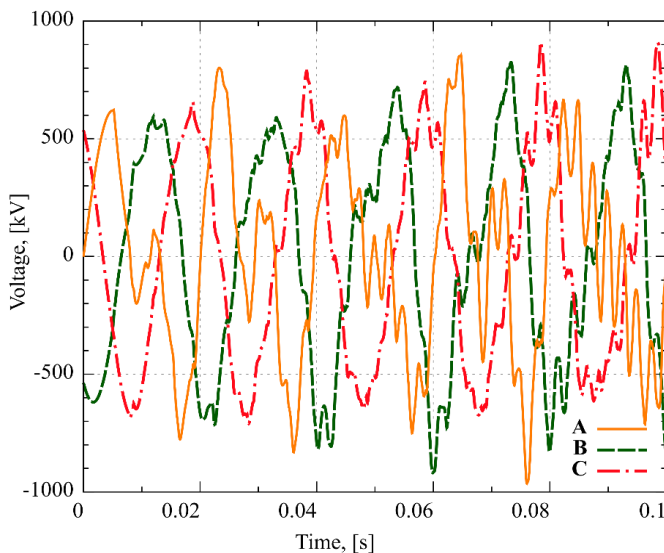


Рис. 14 Анормальні резонансні перенапруги на другій гармонічній складовій

значення. Зменшення залишкової намагніченості здійснюється шляхом проходження постійного струму протилежної полярності через одну з обмоток осердя магнітопроводу АТ.

Процес розмагнічування здійснюється в кілька циклів. У першому циклі струм розмагнічування повинен бути, щонайменше, вдвічі більше струму без

Найефективніші і найбільш виправдані серед способів зменшення кидка струму намагнічування АТ при його ввімкненні – це способи зменшення результуючого магнітного потоку до початку перехідного процесу в колі «первинна обмотка АТ – лінія». Перший спосіб полягає у розмагніченні магнітопроводу від залишкової намагніченості, що виникає внаслідок раптового зняття напруги живлення та переривання струму при його проходженні через ненульове

навантаження АТ при номінальній напрузі. У кожному наступному циклі струм розмагнічування повинен бути приблизно на 30% меншим, ніж струм попереднього циклу. В останньому циклі струм розмагнічування не повинен бути більшим за струм без навантаження АТ. Випрямні пристрої можуть використовуватися як джерело постійного струму при застосуванні пристрою розмагнічування АТ.

ВИСНОВКИ

В дисертаційній роботі отримано нові теоретично обґрунтовані результати, які вирішують науково-прикладну проблему підвищення надійності та ефективності функціонування МЕМ завдяки розробленню нових моделей та методів аналізу і управління режимами роботи за умов структурної несиметрії.

Основні наукові та практичні результати.

1. Комплексно вирішено проблему підвищення надійності та ефективності функціонування МЕМ за умов тривалих неповнофазних режимів завдяки обґрунтованому використанню КШР для оптимізації режимів роботи в якості керуючих впливів за критерієм мінімуму втрат активної потужності.

2. Розроблені методи визначення індуктивного опору СТАТКОМ, які, на відміну від традиційних, дають змогу реалізації керованого ОАПВ з мінімально можливою тривалістю циклу та відповідним підвищенням рівня режимної безпеки.

3. Розроблено модель ЕВ та визначено часові інтервали керованої комутації, що, на відміну від загальноприйнятих методів визначення моментів комутації, враховують появу аперіодичної складової струму та попереджають пошкодження дугогасильних камер ЕВ автокомпресійного типу.

4. Розроблено метод притлумлення внутрішніх перенапруг в циклі ТАПВ, який передбачає індивідуальне включення фаз в таких точках переходу через нуль кривих напруги на контактах вимикача, які утворюють послідовність з мінімальним часовим інтервалом і розташовуються поблизу мінімуму максимальної з обвідних напруг, що на відміну від існуючих методів запобігання перенапругам, забезпечує безпечні умови включення для кожної фази та узгодження моментів комутації фаз між собою.

5. Розроблено математичну модель трифазного КШР з підмагнічуванням, в якій використано узагальнену електричну схему для врахування реакції системи регулювання реактора та моделювання швидкості зміни потужності КШР.

6. Запропоновано метод визначення умов комутації ШР, що дозволяє розрахувати параметри спрацьовування пристроїв керованої комутації для трифазних реакторів будь-якої конструкції. Метод відрізняється від відомих визначенням умов включення та відключення реакторів і заснований на поданні схеми заміщення груп однофазних ШР у вигляді чотирипроменевої зірки.

7. На основі запропонованої математичної моделі ЛЕП НВН у фазових координатах розроблено новий метод розрахунку коефіцієнтів несиметрії та струмів дуги підживлення. Метод дає змогу обґрунтувати застосування спрощеної схеми транспозиції фаз, що забезпечує зниження коефіцієнтів несиметрії та підвищує ефективність гасіння дуги при однофазних пошкодженнях у циклі ОАПВ.

8. Розроблено метод керованого включення та відключення ШР на основі багатофакторного аналізу стану комутуючого вимикача, включаючи врахування технічних умов роботи, часу безопераційного простою вимикача та часу його дії у циклах попередніх комутацій. Такий підхід дозволив підвищити надійність роботи реакторної групи та збільшити міжремонтний період

9. Теоретично обґрунтовані принципи ефективного притлумлення струму повторної дуги підживлення та зменшення резонансних перенапруг шляхом використання запропонованого методу квазіадаптивного ОАПВ суть якого полягає у мінімізації сили струму дуги короткого замикання та забезпечення точності визначення моменту увімкнення від'єднаної фази з використанням визначених в реальному часі струмів керованих шунтувальних реакторів непошкоджених фаз ЛЕП НВН.

10. Розроблено новий алгоритм автоматичного повторного увімкнення ЛЕП НВН зі встановленими ШР, що ґрунтується на стратегії вибору значень часових інтервалів за поточним графіком обвідної напруги на контактах ЕВ. Реалізація нового алгоритму на відміну від загальноприйнятого дозволяє підвищити ефективність АПВ та надійність функціонування комутаційної апаратури.

11. Результати використання розроблених моделей та методів лягли в основу методичних рекомендацій по запровадженню сучасних засобів управління режимами магістральних електричних мереж ОЕС України з метою підвищення надійності роботи та збільшенню пропускної здатності, зокрема за форс-мажорних умов.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Публікації, які відображають основний зміст дисертації:

1. **Кучанський В.В.**, Малахатка Д.О.. Заходи та технічні засоби підвищення ефективності режимів роботи магістральних електричних мереж. Вінниця: ГО «Європейська наукова платформа», 2021. 121 с.(Особистий внесок - написання 2 розділів з 3-х).

2. Зайцев Є.О., **Кучанський В.В.**, Гунько І.О. Підвищення експлуатаційної надійності та ефективності роботи електричних мереж та електроустановок. Вінниця: ГО «Європейська наукова платформа», 2021. 121 с. (Особистий внесок – написання 1 розділу з 3-х).

3. Кузнецов В. Г., Тугай Ю. І., **Кучанський В. В.** Анормальні перенапруги в магістральних електричних мережах з джерелами спотворень. Одеса : Видавничий дім "Гельветика", 2025. 170 с. DOI: 10.35668/978-617-554-449-(Особистий внесок – написання 2 розділів з 4-х).

4. Кузнецов В.Г., Тугай Ю.І., **Кучанський В.В.** Вплив коронного розряду на кратність внутрішніх перенапруг у магістральних електричних мережах. *Технічна електродинаміка*. 2017. №6. С.55–60. doi.org/10.15407/techned2017.06.055 **Index in SCOPUS**. (Особистий внесок – проведення досліджень для вивчення умов виникнення внутрішніх перенапруг з врахуванням впливу коронного розряду, що виникають в циклі спрацьовування ОАПВ).

5. Тугай Ю.І., **Кучанський В.В.**, Тугай І.Ю. Застосування керованих пристроїв компенсації зарядної потужності ЛЕП НВН в електричних мережах. *Технічна електродинаміка*. 2021. №1. С. 53–58. doi.org/10.15407/techned2021.01.053. **Index in SCOPUS**. (Особистий внесок – проведення досліджень для вивчення впливу керованої поперечної компенсації реактивної потужності на електромагнітні перехідні процеси за умов комутацій компенсованих ЛЕП НВН).

6. **Kuchansky V.**, Malakhatka D., Dumenko V., Denissova N., Yeraliyeva B. Assessment of the phase-by-phase transmission line effect asymmetry on power transfer capability in open phase mode. *Przegląd Elektrotechniczny*. 2021. № 9.P. 50–53. <http://dx.doi.org/10.15199/48.2021.09.11>. **Index in SCOPUS**. (Особистий внесок – розроблено математичну модель ЛЕП НВН з врахуванням фактичної схеми транспозиції для оцінювання впливу повздовжньої несиметрії на пропускну здатність).

7. **Kuchansky V.**, Rubanenko O., Influence assesment of autotransformer remanent flux on resonance overvoltage. *UPB Scientific Bulletin, Series C: Electrical Engineering and Computer Science*. 2020. №82(3). P. 233-250. **Index in SCOPUS**. (Особистий внесок – розроблено математичні моделі ЛЕП НВН та групи однофазних АТ для аналізу початкових умов комутацій).

8. **Kuchansky V.**, Satyam P., Rubanenko O., Hunko I., Measures and technical means for increasing efficiency and reliability of extra high voltage transmission lines. *Przegląd Elektrotechniczny*. 2020. № 11. P. 135–141. doi:10.15199/48.2020.03.27. **Index in SCOPUS**. (Особистий внесок – розроблено математичні моделі компенсованих ЛЕП НВН для порівняльного аналізу заходів та технічних засобів притлумлення аперіодичної складової струму).

9. Khasawneh, A.; Qawaqzeh, M.; **Kuchansky, V.**; Rubanenko, O.; Miroshnyk, O.; Shchur, T.; Drechny, M. Optimal Determination Method of the Transposition Steps of An Extra-High Voltage Power Transmission Line. *Energies* 2021. №14. 6791-6820. <https://doi.org/10.3390/en14206791> **Index in SCOPUS**. (Особистий внесок – розроблено метод визначення кроків транспозиції ЛЕП НВН для мінімізації повздовжньої несиметрії).

10. Belik M., **Kuchansky V.**, Rubanenko O. The Method of the Secondary Arc Suppression in Cycle Single-Phase Auto Reclose with High-Level Penetration Renewable Energy Sources. *Energies*. 2023. №16. **Index in SCOPUS**. <https://doi.org/10.3390/en16196880> (Особистий внесок – розроблено метод вибору опорів компенсаційного реакторів з врахуванням впливу реальної транспозиції проводів ЛЕП НВН).

11. Al_Issa, H.A., Drechny, M., Trrad, I., Qawaqzeh, M., **Kuchansky, V.**, Rubanenko, O., Kudria, S., Vasko, P., Miroshnyk, O., Shchur, T. Assessment of the Effect of Corona Discharge on Synchronous Generator Self-Excitation. *Energies*. 2022, №15. P. 20–41. <https://doi.org/10.3390/en15062024>. **Index in SCOPUS**. (Особистий внесок – розроблено математичні моделі КШР для виводу лінії електропередавання з областей самозбудження синхронних генераторів).

12. **Кучанський В.В.**, Малахатка Д.О. Параметрична оптимізація режимів роботи магістральних електричних мереж за критерієм втрат активної потужності. *Праці Інституту електродинаміки Національної академії наук*

України. вип. 59. С. 72–81. doi:10.15407/publishing2021.59.072. (Особистий внесок – розроблено метод оптимізації режиму роботи МЕМ за критерієм втрат активної потужності).

13. **Кучанський В.В.**, Малахатка Д.О. Оцінювання впливу несиметрії лінії електропередавання надвисокої напруги на визначення параметрів компенсаційного реактора. *Праці Інституту електродинаміки Національної академії наук України*. 2020. № 57. С. 15–26. <https://doi.org/10.15407/publishing2020.57.015> (Особистий внесок – оцінено вплив фактичної схеми транспозиції ЛЕП НВН на вибір опору компенсаційних реакторів по умові гасіння вторинної дуги).

14. **Кучанський В.В.** Застосування концепції SMART GRID з метою збільшення пропускної здатності лінії електропередачі надвисокої напруги. *Праці інституту електродинаміки національної академії наук України*. 2020. № 55 С. 40– 45. (Особистий внесок – оцінено керованої поперечної компенсації реактивної потужності на натуральну потужність та пропускну здатність ЛЕП НВН).

15. Тугай Ю.І., **Кучанський В.В.**, Лиховид Ю.Г. Вплив початкових умов на перехідні процеси при комутаціях автотрансформаторів. Вісник Харківського національного технічного університету імені Петра Василенка «Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України». 2019 № 203 С.59-60. (Особистий внесок – оцінив залишкового намагнічування АТ на умови виникнення резонансних перенапруг на вищих гармонійних складових).

16. **Кучанський В.В.**, Савицький О.В. Технічні засоби подавлення резонансних явищ в електричних мережах. *Праці Інституту електродинаміки Національної академії наук України*. 2021. № 60. С. 044. DOI: doi:10.15407/publishing2021.60.044.(Особистий внесок – оцінено вплив зміни ступеня компенсації зарядної потужності ЛЕП НВН на умови виникнення параметричного самозбудження синхронних генераторів).

17. Belik M., **Kuchansky V.**, Rubanenko O. Method for determining the resonant frequencies of extra high voltage power transmission line. *Przegląd elektrotechniczny*. 2023. No. 10. P. 39–42. DOI: doi:10.15199/48.2023.10.7. **Index in SCOPUS**. (Особистий внесок – розроблено метод визначення резонансних частот ЛЕП НВН для аналізу умов виникнення внутрішніх перенапруг).

18. **Кучанський В. В.** Застосування автоматичного шунтування фаз для подавлення повторної дуги в паузі ОАПВ лініях електропередавання надвисокої напруги. *Енергетика: економіка, технології, екологія*. 2019. № 1. С. 49-55. (Особистий внесок – розроблено технічний засіб подавлення вторинної дуги підживлення в паузі ОАПВ).

19. Тугай Ю. І., **Кучанський В. В.**, Мельничук В. А. Застосування передвключених активних опорів для подавлення резонансних перенапруг у несинусоїдальних режимах ліній електропередач. *Енергетика та комп'ютерно-інтегровані технології в АПК*. 2017. № 1 (6). С. 7-9. (Особистий внесок – розроблено технічний захід притлумлення аперіодичної складової струму за умов комутацій компенсованих ліній ЛЕП НВН).

20. Кузнецов В.Г., Тугай Ю.І., Кошман В.І., **Кучанський В.В.**, Сабарно Л.Р., Тугай І.Ю., Шполянський О.Г., Нікішин Д.А. Розробка методів і моделей

аналізу аномальних режимів електричних мереж з метою їх оптимізації. *Праці Інституту електродинаміки Національної академії наук України*. 2019. № 54. С. 19-28. (Особистий внесок – розроблено математичну модель АТ для аналізу умови виникнення та розвитку внутрішніх перенапруг).

21. **Кучанський В.В.** Запобігання резонансним перенапругам у несинусоїдальних режимах магістральних електричних мереж. *Праці Інституту електродинаміки НАН України*. 2017. № 46. С. 6–13. (Особистий внесок – проведено аналіз тривалих несиметричних режимів у магістральних електричних мережах у разі аварійному вимкненні однофазних АТ).

22. **Кучанський В.В.** Керована комутація елегазовими вимикачами в магістральних електричних мережах. *Праці Інституту електродинаміки НАН України*. 2017. № 48 С. 38– 43. (Особистий внесок – розроблено метод визначення оптимальних моментів комутації ЕВ з урахуванням аперіодичних складових струму).

23. **Kuchanskyi V.V.** Phase structure influence estimation of the extra high voltage line on abnormal resonance overvoltages. *Proceedings of the Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine*. 2019. No. 52 P. 22-27. (Особистий внесок – розроблено модель ЛЕП НВН для аналізу конструктивних особливостей на умови виникнення резонансних перенапруг на вищих гармонійних складових).

24. **Кучанський В.В.,** Кузнецов В.Г., Тугай Ю.І., Шполянський О.Г., Тугай І.Ю. Обмеження резонансних перенапруг при підключенні до лінії ненавантаженого автотрансформатора. *Праці Інституту електродинаміки НАН України*. 2015. № 1. С. 110 – 116. (Особистий внесок – розроблено математичну модель трифазної лінії електропередавання для аналізу резонансних перенапруг).

25. **Kuchanskyi V.V.** The prevention measure of resonance overvoltages in open-phase mode in extra high voltage transmission lines. *Proceedings of the Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine*. 2017. No. 47. P. 23 – 28. (Особистий внесок – показано доцільність використання неповнореакторного режиму для уникнення небезпечних перенапруг під час безструмових пауз ОАПВ).

26. **Кучанський В.В.** Експрес-оцінка резонансних перенапруг в аномальних режимах магістральних електричних мереж. *Вісник Університету "Львівська Політехніка" Серія: Електроенергетичні та електромеханічні системи*. 2016. № 840. С. 67 – 71. (Особистий внесок – проаналізовано умови гасіння дуги під час однофазних замикань ліній ЛЕП НВН).

27. **Кучанський В.В.** Дослідження резонансних перенапруг у магістральних електричних мережах 750 кВ з несинусоїдальним джерелом спотворення за допомогою штучної нейронної мережі. *Праці Інституту електродинаміки НАН України*. 2018. № 49. С. 10– 17. (Особистий внесок – розроблено штучну нейронну мережу для аналізу умов виникнення резонансних перенапруг спричинених за умов комутацій ненавантажених АТ).

28. **Kuchanskyi V.V.** Abnormal resonance overvoltages in main power electrical networks with sources of distortions. *Proceedings of the Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine*. 2018. No. 50. P. 27–37. (Особистий внесок – зроблено літературний огляд резонансних

перенапруг в паузі ОАПВ та за умов комутацій ненавантажених однофазних АТ).

29. Кузнецов В.Г., Тугай Ю.І., **Кучанський В.В.**, Лиховид Ю.Г., Мельничук В.А. Резонансні перенапруги у несинусоїдному режимі магістральної електричної мережі. *Електротехніка та електромеханіка*. 2018. № 2 С. 69 – 73. DOI: 10.20998/2074-272X.2018.2.12 (**Index in Web of Science**). (Особистий внесок – розроблено метод визначення областей існування внутрішніх перенапруг парної кратності за умов комутації ненавантаженого АТ).

30. **Кучанський В.В.**, Зайцев Є.О., Коваленко О.М. Аналіз експериментальних оцінок втрат потужності на коронування повітряних міжсистемних ліній електропередавання. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2024. № 4. С. 22–29. (Особистий внесок – розроблено математичну модель ПЛ з врахуванням впливу коронного розряду для визначення втрат активної потужності).

31. **Кучанський В. В.**, Тугай Ю.І., Тугай І.Ю. Обґрунтування конструкції розщепленої фази повітряних міжсистемних ліній електропередавання. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2024. № 6. С. 27–33. (Особистий внесок – запропонована конструкція розщепленої фази ЛЕП НВН).

32. **Кучанський В.В.**, Кузнецов В.Г., Кошман В., Сабарно Л., Севастюк І. Аналіз електромагнітних перехідних процесів під час комутацій ліній електропередавання надвисокої напруги та автотрансформаторів. *Herald of Khmelnytskyi National University. Technical Sciences*, 2025. 347(1), 182-188. <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2025-347-25> Особистий внесок – розроблено математичні моделі ЛЕП НВН та АТ для аналізу резонансних перенапруг за умов комутування ненавантажених АТ.

33. **Kuchansky V. V.** The application of controlled switching device for prevention resonance overvoltages in nonsinusoidal modes. 2017 IEEE 37th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO): In Proc. of the Int. Conf. Kyiv, 2017. Pp. 394–399. (Особистий внесок – розроблено метод визначення моментів комутації ЕВ з урахуванням характеристик аперіодичної складової струму).

34. **Kuchansky V.**, Rubanenko O., Hunko I. Autoparametric Self-Excitation of Even Harmonics in Extra High Voltage Transmission Lines. 2021 IEEE PES/IAS PowerAfrica: In Proc. of the Int. Conf. 2021. Pp. 1–5. doi: 10.1109/PowerAfrica52236.2021.9543263. 9. (Особистий внесок – розроблено метод керованої комутації елегазових вимикачів для комутацій ШР та АТ).

35. **Kuchansky V.**, Zaitsev I. O. Corona Discharge Power Losses Measurement Systems in Extra High Voltage Transmissions Lines. 2020 IEEE 7th International Conference on Energy Smart Systems (ESS): In Proc. of the Int. Conf. Kyiv, 2020. Pp. 48–53. doi: 10.1109/ESS50319.2020.9160088. (Особистий внесок – одержано аналітичні вирази визначення технологічних втрат активної потужності та емпіричні вирази втрат активної потужності на коронування проводів ЛЕП НВН).

36. **Kuchansky V.** Influence of Transmission Line Wire Transposition on Asymmetry Levels and Power Transfer Capability. 2020 IEEE Congreso Bienal de

Argentina (ARGENCON): In Proc. of the Int. Conf. 2020. Pp. 1–8. doi: 10.1109/ARGENCON49523.2020.9505391. (Особистий внесок – оцінено вплив схеми транспозиції фаз на пропускну здатність ЛЕП НВН).

37. **Kuchansky V.** Application of Controlled Shunt Reactors for Suppression Abnormal Resonance Overvoltages in Assymetric Modes. 2019 IEEE 6th International Conference on Energy Smart Systems (ESS): In Proc. of the Int. Conf. 2019. Pp. 122–125. (Особистий внесок – розроблено модель для оцінювання впливу КШР для розлагодження резонансного контуру).

38. **Kuchansky V., Rubanenko O., Cosovic M., Hunko I.** Analyzing the Effects of Abnormal Resonance Voltages using Artificial Neural Networks. 2022 21st International Symposium INFOTEN-JAHORINA (INFOTEN): In Proc. of the Int. Conf. 2022. Pp. 1–6. doi: 10.1109/INFOTEN53737.2022.9751253. (Особистий внесок – розроблено штучну нейронну мережу для визначення характеристик резонансних перенапруг на вищих гармонійних складових).

39. Belik M., **Kuchansky V., Yuri L., Rubanenko O.** Optimal Value Determining Method of Parameters Compensating Devices of Bulk Electric Networks. 2022 IEEE 8th International Conference on Energy Smart Systems (ESS): In Proc. of the Int. Conf. Kyiv, 12–14 Oct. 2022. Pp. 63–68. doi: 10.1109/ESS57819.2022.9969291. (Особистий внесок – розроблено метод визначення оптимальних значень реактивної потужності КШР.)

40. Буткевич О.Ф., **Кучанський В.В.** Забезпечення ефективного функціонування енергосистеми в неповнофазних режимах. Electrical and Power Engineering and Electromechanics (EPEE 2023): матеріали міжнар. наук.-практ. конф., м. Одеса, 15 черв. 2023 р. Одеса, 2023. С. 26–28. (Особистий внесок – розроблено позиційну модель електроенергетичної системи для аналізу неповнофазних режимів роботи MEM).

41. Blinov I.V., Zaitsev I.O., **Kuchansky V.V.** Problems, methods and means of monitoring power losses in overhead transmission lines. Systems, Decision and Control in Energy I / editors: Babak V.P., Isaienko V., Zaporozhets A.O. Springer, 2020. P. 123-136). (Особистий внесок – розроблено метод визначення складових сумарних втрат активної потужності ПЛ НВН).

42. **Kuchansky V.V., Malakhatka D.O., Blinov I.** Efficiency increase of open phase modes in bulk electrical networks. Systems, Decision and Control in Energy II/ editors: Zaporozhets A.O., Artemchuk V. Springer, 2021. P. 31-48. (Особистий внесок – розроблено імітаційну модель ЛЕП НВН для аналізу повторної дуги підживлення в паузі ОАПВ).

43. **Kuchansky V., Malakhatka D., Zaporozhets A.** Operating modes optimization of bulk electrical power networks: structural and parametrical methods. Power systems research and operation: Selected problems / editors: Kyrylenko O., Zharkin A. and other. Springer, 2021, P. 99- DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-82926-1_5 (Особистий внесок – розроблено метод аналізу неповнофазних режимів роботи MEM).

44. **Kuchansky V., Tereshchuk V.** Method of regulating the operating modes of main electrical systems in terms of voltage and reactive power. Systems, Decision and Control in Energy III / editors: Zaporozhets A. Springer, 2021. P. 23–38 DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-87675-3_2 (Особистий внесок – розглянуто

особливості використання керованих пристроїв компенсації реактивної потужності в неповнофазних режимах роботи).

45. **Kuchansky V., Butkevych O.** On effective use's ensuring of high-voltage electrical networks under non-full phase operational conditions. Power systems research and operation: Selected problems / editors: Kyrylenko O., Denysiuk, S. and other. Springer, 2024, P. 31 – 48. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-44772-3_2 (Особистий внесок – розроблено методи аналізу несиметричних режимів з оцінюванням впливу несиметрії на АТ).

46. **Кучанський В. В.,** Малахатка Д.О. Лінія електропередавання надвисокої напруги: пат. 148092 Україна. МПК H02J 3/26 /, № u 2021 01412; заявл. 19.03.2021 ; опубл. 01.07.2021, Бюл. № 26. 1 с. (Особистий внесок – запропоновано неповний цикл транспозиції проводів ЛЕП НВН).

АНОТАЦІЇ

Кучанський В.В. Аналіз та управління режимами роботи магістральних електричних мереж за умов структурної несиметрії. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису. Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.14.02 – електричні станції, мережі і системи. – Інститут електродинаміки Національної академії наук України, Київ, 2025.

Дисертаційну роботу присвячено вирішенню важливої науково-прикладної проблеми підвищення надійності та ефективності функціонування ОЕС України в частині магістральних електричних мереж за найвразливіших умов їхньої експлуатації – умов структурної несиметрії. Внаслідок виконання роботи досягнуто її основну мету, яка полягала в розвитку теорії, розробленні нових моделей та методів аналізу і управління режимами роботи МЕМ за умов структурної несиметрії для підвищення надійності та ефективності їхнього функціонування. Для досягнення поставленої мети потрібно було виконати низку завдань, які стосувалися розроблення математичних та цифрових моделей обладнання МЕМ, з використанням яких було виконано дослідження неповнофазних стаціонарних, квазістаціонарних та перехідних процесів в МЕМ і розроблено методи для визначення параметрів такого обладнання для досягнення умов його безпечного функціонування.

Комплексна проблема надійності та ефективності функціонування МЕМ ОЕС України завжди була в фокусі уваги, оскільки ці мережі є системотвірними і мають визначальний вплив на режими роботи ОЕС України, насамперед на надійність електропостачання в так звані дефіцитні регіони України, в яких обсяги споживання електроенергії значно перевищують обсяги її виробництва. За умов широкомасштабних воєнних дій росії проти України ця проблема набула особливої гостроти, адже до «середньостатистичних» пошкоджень обладнання окремих фаз, що виникали і за мирних умов, додалися пошкодження, спричинені обстрілами та ракетно-дроновими атаками ворога.

Усі такі пошкодження призводять до виникнення структурної несиметрії МЕМ та тривалих неповнофазних режимів, за яких зростають сумарні втрати активної потужності та з'являються умови для виникнення резонансних перенапруг, що призводять до пошкоджень основного обладнання МЕМ. Такі пошкодження, крім втрати досить вартісного обладнання МЕМ, можуть

призводити до довготривалого знеструмлення районів електроспоживання, до розвитку аварій та блекаутів, що характеризуються значно більшими територіями та обсягами потужності знеструмлених споживачів. Навіть якщо обмежитися урахуванням лише зазначених негативних наслідків, пов'язаних із виникненням структурної несиметрії МЕМ, то і цього цілком достатньо, щоб дійти висновку про актуальність проблеми, про гостру потребу виконання досліджень, спрямованих на підвищення надійності та ефективності функціонування МЕМ за умов структурної несиметрії.

Ключові слова: магістральна електрична мережа, неповнофазний режим роботи, лінії електропередавання надвисокої напруги, керована комутація, керований шунтувальний реактор.

Kuchansky V.V. Analysis and control of operating modes of main electrical networks under conditions of structural asymmetry. - Manuscript. Dissertation for the scientific degree of Doctor of Technical Sciences in the specialty 05.14.02 – electrical stations, networks and systems. – Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, 2025.

The dissertation work is devoted to solving an important scientific and applied problem of increasing the reliability and efficiency of the functioning of the Ukrainian electrical power systems in the part of the main electrical networks under the most vulnerable conditions of their operation - conditions of structural asymmetry. As a result of the work, its main goal was achieved, which was to develop the theory, develop new models and methods for analyzing and controlling the operating modes of main electrical power networks under conditions of structural asymmetry to increase the reliability and efficiency of their functioning. To achieve the set goal, it was necessary to perform a number of tasks related to the development of mathematical and digital models of main electrical power systems equipment, using which studies of incomplete-phase stationary, quasi-stationary and transient processes in main electrical power networks were carried out and methods were developed for determining the parameters of such equipment to achieve the conditions for its safe functioning.

The complex problem of reliability and efficiency of the operation of the main electrical networks of the Unified Power System of Ukraine has always been in the focus of attention, since these networks are system-forming and have a decisive impact on the operating modes of the Unified Power System of Ukraine, primarily on the reliability of electricity supply to the so-called deficient regions of Ukraine, in which the volumes of electricity consumption significantly exceed the volumes of its production. Under the conditions of large-scale russian military operations against Ukraine, this problem has become particularly acute, because in addition to the "average statistical" damage to the equipment of individual phases, which occurred even under peaceful conditions, damage caused by shelling and missile and drone attacks by the enemy was added. All such damage leads to the emergence of structural asymmetry of the main electrical networks and long-term incomplete-phase modes, under which the total losses of active power increase and conditions appear for the occurrence of resonant overvoltages, which lead to damage to the main electrical networks equipment. Such damage, in addition to the loss of quite expensive main electrical networks equipment, can lead to long-term power outages in areas of

electricity consumption, to the development of accidents and blackouts, characterized by significantly larger territories and volumes of power of de-energized consumers. Even if we limit ourselves to considering only the above-mentioned negative consequences associated with the occurrence of structural asymmetry of main electrical networks, this is quite enough to conclude about the relevance of the problem, about the urgent need for research aimed at increasing the reliability and efficiency of main electrical networks operation under conditions of structural asymmetry.

The paper improves the mathematical model of a three-phase power line, which takes into account the influence of corona discharge and lightning protection cables on the level of overvoltages during the asymmetrical operation of the power line, and for the first time, the results of theoretical and experimental studies substantiate that for optimizing the operating modes of electrical networks in quasi-real time, it is advisable to use controlled shunt reactors along with traditional means.

Electromagnetic transient processes of shunt reactor switching in main electrical networks have been analyzed and methods of their controlled switching on/off have been developed in order to increase the reliability of the functioning of the Ukrainian Unified Power System. Models and technical solutions of controlled switching devices have been proposed, which ensure the reduction of the negative effects of aperiodic current components and overvoltages. To configure controlled switching devices in order to prevent damage to SF₆ arc extinguishing chambers, a method for determining the SF₆ circuit breaker opening/interruption time has been developed for the first time, which controls the achievement of standard values by the aperiodic components of phase currents with preservation of the phase sequence at the moment of instantaneous acquisition of zero current values.

The paper considers the influence of phase heterogeneity of parameters of extra-high voltage overhead lines on the asymmetry of currents and voltages in power transmission systems. It is shown that such asymmetry can significantly complicate the operation of relay protection and negatively affect generator equipment. The need for phase transposition as an effective means of reducing asymmetry is substantiated. Particular attention is paid to the influence of the transposition scheme on the arc extinguishing processes in single-phase faults and the efficiency of the auto reclose pause .

It is noted that the correct choice of the transposition scheme is critical not only for ensuring permissible parameters in stable modes, but also for reliable elimination of emergency situations. Using the real-time currents of the controlled shunt reactor of intact phases of the overhead power line, a method for determining the inductance of a static synchronous compensator was first developed to compensate for the interphase capacitance according to the criterion of the minimum single phase auto reclose cycle time to minimize the short-circuit arc current and ensure the accuracy of setting the moment of switching on the disconnected phase.

The analysis of the features of long-term asymmetric modes in main electrical networks caused by structural asymmetry, which occurs, in particular, during emergency shutdown of single-phase shunt reactors (SR) and autotransformers. The increase in the frequency and duration of such modes due to the influence of natural

factors and military operations has been established, which leads to damage mainly to one phase of the equipment and the emergence of incomplete-phase modes.

A mathematical model of the reactor core has been developed in the form of dependences of currents and voltages of the reactor's main winding relative to the control winding current, which allows taking into account the time constant of the reactor power change on the operating modes of main electrical networks. The mathematical model takes into account the design features of the reactor's magnetic core and the characteristics of electrical steel. The proposed model allows increasing the accuracy of the analysis of the dynamic operating modes of the reactor core in real power systems.

The feasibility of using controlled shunt reactors as a means of active influence on the operating parameters of main electrical networks to minimize technological losses of electricity has been substantiated. An optimization model has been proposed that takes into account the network configuration, equipment parameters and its operating modes, in order to ensure effective selection of the installation location and parameters of the controlled shunt reactors. The paper improves the mathematical model for analyzing the processes of the operation of the controlled shunt reactor installed in the main electrical networks. The improved mathematical model takes into account the design features of the reactor magnetic core and the characteristics of electrical steel. The proposed model allows increasing the accuracy of the analysis of the dynamic modes of operation of the controlled shunt reactors in real power systems.

Keywords: main electrical network, non-phase operation mode, extra-high voltage power transmission lines, controlled switching, controlled shunt reactor.