

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу **Кучанського Владислава Володимировича** «Аналіз та управління режимами роботи магістральних електричних мереж за умов структурної несиметрії», поданої на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.14.02 – електричні станції, мережі і системи.

Актуальність теми.

Характерним в останні роки в електроенергетиці України є те, що відбувається цифрова трансформація галузі, реалізуються тісні зв'язки з енергосистемою Європи в напрямку стандартизації, в ОЕС України все більшу роль відіграють відновлювані джерела енергії. Все це відбувається в умовах воєнних дій, що призводить до руйнування енергетичної інфраструктури. В таких складних умовах необхідно забезпечити енергетичну безпеку країни і одночасно планувати дії для повоєнного відновлення. Особлива роль щодо енергетичної стійкості відводиться магістральним електричним мережам (МЕМ), на яких покладені системо утворювальні завдання.

Очевидно, що на сьогодні проблема підвищення надійності та ефективності функціонування МЕМ набула особливої гостроти. Пошкодження 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, результатом чого є перевантаження АТ та до збільшення технологічних витрат електроенергії. Появляється 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.

Метою роботи Кучанського В.В. є подальший розвиток теорії, нових моделей та методів аналізу і управління режимами роботи магістральних електричних мереж за умов структурної несиметрії для підвищення надійності та ефективності їхнього функціонування, що визначає її актуальність.

У відповідності до поданих дисертаційних матеріалів результати роботи є складовою частиною науково-дослідних розробок Інституту електродинаміки 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); «Розвиток теорії, розроблення методів інтелектуалізації технологічних процесів та засобів керування, моніторингу, діагностування і вимірювання в електроенергетичних та електротехнічних системах» («Інтехен-2», 2020-2021 рр., № ДР 0120U002125); «Підвищення надійності та ефективності роботи магістральних електричних мереж ОЕС України в умовах наявності джерел несинусоїдальних спотворень» («Нова енергетика», 2019-2021 рр., № 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.

Зміст і коротка характеристика результатів дослідження.

У першому розділі наведено аналіз існуючих досліджень за даною науково-практичною проблемою, зокрема проведено аналіз сучасного стану режимів роботи МЕМ, викликаних структурною несиметрією. Наведено визначення терміну «структурна несиметрія», як стану, що характеризується неповнофазною схемою функціонування або різними параметрами та складом обладнання фаз. Досліджено вплив фактору підвищення напруги в МЕМ понад допустимі рівні внаслідок природних причин та виходу із ладу електротехнічного обладнання МЕМ через руйнування воєнного стану. Обґрунтовано та зформульовано завдання для подальшого дослідження.

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. Обґрунтовано вибір засобів для компенсації реактивної потужності, пріоритет надано керованим шунтувальним реакторам. Показано, що відсутність контрольованого балансу потужності в енергосистемі може призвести до негативних наслідків, які слід уникати, реагуючи в темпах процесів у системі. Для ефективного регулювання напруги діапазони трансформаторів мають бути економічно обґрунтовані залежно від

конкретних умов. На прикладі моделювання електричної мережі досліджено задачу оптимізації та метод її вирішення. Наведено результати моделювання параметрів режиму роботи електричної мережі енергосистеми, встановлено величину зниження втрат. Показано, що збільшення капітальних витрат через впровадження КШР замість традиційних реакторів компенсується зменшенням втрат електроенергії при переході до економічного режиму енергосистеми.

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 обмеження струму дуги підживлення короткого замикання. Визначено аналітичні вирази, які зв'язують значення індуктивності КШР із потужністю, що передається по лінії. Запропоновано спосіб симетрування режиму роботи неповної фази зменшенням струмів зворотної та нульової послідовностей. Визначено межі області допустимих неповнофазних режимів автотрансформаторних груп та їхньої залежності від параметрів сусідніх систем; запропоновано способи симетрування цих режимів. Показано, щоб зменшити витрати на капіталовкладення та спростити обслуговування таких ліній 750 кВ існує можливість застосувати спрощену схему транспозиції. Розроблено підхід вибору опору компенсаційного реактора з врахуванням схеми транспозиції, що дозволяє підвищити ефективність застосування циклу спрацьовування ОАПВ.

У четвертому розділі вирішується задача зменшення несиметрії МЕМ керованими пристроями компенсації реактивної потужності. Показано, що керовані шунтувальні реактори дозволяють здійснити регулювання параметрів режиму системи в широкому діапазоні, дозволяючи збільшувати пропускну здатність міжсистемної ЛЕП та забезпечувати допустимі рівні напруги. Розглянуто комплекс завдань, пов'язаних із розробленням ефективних методів розрахунку пропускну здатності, граничних режимів та оцінювання запасів статичної аперіодичної стійкості ЕЕС.

У п'ятому розділі розроблено метод 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. Моделюванням несиметричних режимів живлення ЛЕП НВН (під час ОАПВ та в інших аномальних режимах) досліджені особливості появи небезпечних квазістаціонарних перенапруг резонансного характеру на ізоляції «фаза–земля» вимкнення фаз залежно від довжини ЛЕП та розміщення ШР на підстанціях та електростанціях. Показано, що порівняно з традиційним використанням чотирипроменевої схеми ввімкнення ШР через КР зі ступінчастим регулюванням для відлаштування від резонансних умов, плавна зміна індуктивності КШР дозволяє досягти цілі ефективніше.

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. Розглянуто методи захисту від

перехідного ферорезонансу (розмикання трикутника обмотки ПН автотрансформатора, з'єднання цих обмоток у зірку, включення в розсічення трикутника обмоток ПН резистора). Виявлено умови виникнення та рівні перенапруг на відключеній у циклі ОАПВ фазі лінії, струми підживлення дуги КЗ, частоти коливань напруги на відключеній фазі та тривалості їх згасання під час моделювання перехідних процесів на лініях НВН під час досліджень та налаштування пристроїв РЗА. Удосконалено методи аналізу та математичні моделі для дослідження аномальних перенапруг у ЛЕП НВН. Проаналізовано вплив залишкової намагнічування ненавантаженого автотрансформатора на резонансні перенапруги та кидки струмів намагнічування. Приділено увагу удосконаленню підходів до аналізу роботи однофазних автотрансформаторів і керованих шунтувальних реакторів в умовах неповнофазних режимів, що дозволяє своєчасно виявляти потенційно небезпечні режими та обґрунтовувати оптимальні стратегії керування.

Таким чином, Кучанський В.В., провівши сукупність наукових досліджень, спираючись на сучасні методи досліджень і технічні засоби, досяг поставлену мету – розвинув теорію для розроблення нових моделей та методів аналізу і управління режимами роботи МЕМ за умов структурної несиметрії для підвищення надійності та ефективності їхнього функціонування.

Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, їх достовірність і новизна.

В дисертації Кучанський В.В. отримав такі основні результати, які мають **наукову новизну**. Вона полягає в установленні нових властивостей досліджуваних процесів. Запропоновані підходи та методи створюють достатню наукову базу для підвищення надійності та ефективності функціонування МЕМ. Зокрема:

- розроблено математичну модель трифазної лінії електропередачі надвисокої напруги (ЛЕП НВН), в якій враховано вплив коронного розряду на рівень перенапруг за несиметричного режиму роботи ЛЕП;

- обґрунтовано використання керованих шунтувальних реакторів для оптимізації режимів роботи МЕМ за критерієм мінімуму сумарних втрат активної потужності;

- розроблено математичну модель керованого шунтувального реактора у формі залежностей струмів і напруги основної обмотки реактора від струму обмотки керування під час моделювання перехідних процесів;

- для мінімізації струму дуги короткого замикання та визначення моменту увімкнення від'єднаної фази з використанням ШР непошкоджених фаз розроблено метод визначення індуктивності статичного синхронного компенсатора для компенсації міжфазної ємності;

- для запобігання пошкодженню дугогасильних камер елегазового вимикача розроблено метод визначення часу його вимкнення і зменшення аперіодичної складової струму.

Положення і висновки відносно суті проблеми, принципів і методів побудови математичних моделей обґрунтовані в роботі і базуються на принципах системного аналізу, теорії математичного моделювання, теорії

ймовірності, імітаційного комп'ютерного моделювання. Висновки по розділах і по роботі в цілому відповідають змісту дисертації і є об'єктивними. Можна стверджувати, що приведені в дисертаційній роботі Кучанського В.В. висновки і рекомендації щодо використання результатів досліджень **достатньо обгрунтовані** і відповідають дійсності. **Достовірність** їх забезпечена коректністю використання математичного апарату та наукових положень. Вона підтверджується результатами тестування розроблених методів, моделей, програмних засобів впровадженням розробок в виробництво та результатами експериментальних досліджень. Адекватність моделей підтверджена збіжністю з фактичними значеннями досліджуваних величин, отриманими за умов, аналогічних до модельованих.

Основні результати дослідження **достатньо апробовані**. Вони доповідались на багатьох науково-технічних конференціях. За темою дисертаційної роботи опубліковано 3 монографії та 46 друкованих праць, з яких 20 статті – у фахових наукових виданнях України та 7 – у закордонних періодичних виданнях, 10 статей, які включені в наукометричні бази Scopus і WoS. Матеріали доповідей на міжнародних конференціях включені в 5 розділах колективних монографій Scopus. Аналіз публікацій дозволяє зробити висновок, що в них у повному об'ємі представлені матеріали дисертації. Автореферат дисертації відображає її зміст, ідеї і висновки. У авторефераті розкрито внесок дисертанта в даний науковий напрям, розкрито новизна розробок, теоретичні і практичні значення результатів проведених досліджень.

Практична цінність роботи. Запропоновано метод визначення індуктивності статичного синхронного компенсатора, що забезпечує зниження тривалості циклу спрацьовування ОАПВ шляхом компенсації електростатичної складової струму повторної дуги. Обгрунтовано схему транспозиції, в якій на одному циклі транспозиції використовується два одинарних чергування проводів у просторі. Показано, що кількість транспозиційних опор на ЛЕП зі спрощеною схемою зменшується вдвічі, а коефіцієнти несиметрії зворотної послідовності напруги та струму залишаються незмінними. Реалізовано метод аналізу несиметричних режимів МЕМ та вибору засобів їхнього симетрування на основі універсальних розрахункових виразів, що дозволило оперативно оцінювання ефективності симетрування неповнофазного режиму груп АТ 750/330/15,75 кВ, ШР 750 кВ та повітряних ліній 750 кВ. Розроблені моделі та методичні рекомендації із впровадження сучасних засобів управління режимами МЕМ впроваджено у підрозділах координації роботи АСУ ТП електростанцій та САРЧП 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. Методи розв'язування окремих задач можуть бути використані як навчальний матеріал для вузів, що готують фахівців у галузі електроенергетики.

Зауваження щодо змісту та оформлення дисертації.

1. Запропонований у розділі 2 закон регулювання напруги керованого шунтувального реактора за умов сильної структурної несиметрії дозволяє

оптимізувати режими роботи магістральних електричних мереж у квазіреальному часі за критерієм мінімізації сумарних втрат активної потужності. Водночас в роботі не описано яким чином запропонований закон регулювання КШР впливає на: час згасання аперіодичної складової (τ); відсоток випадків виходу значень напруги за межі гранично допустимих значень прописаних у нормативних документах ANSI/IEEE; успішність ОАПВ.

2. У розділі 2 не наведено, як саме враховано вимоги стандартів IEEE та CIGRE при розрахунках і вимірюваннях втрат активної потужності на корону. Це важливо для коректної оцінки втрат активної потужності на корону, адже стандарти визначають методики обліку атмосферних факторів і специфіку вимірювань. Рекомендовано чітко описати використані методи з посиланням на ці стандарти для підвищення достовірності та практичної цінності результатів.

3. У розділі 3 зазначено, що обмеження мінімальної тривалості паузи автоматичного повторного включення (ОАПВ) досягається завдяки застосуванню СТАТКОМ замість компенсаційного реактора у нейтралі групи однофазних шунтувальних реакторів. Описано фізичні процеси в циклі спрацювання ОАПВ та підкреслено ефективність цього технічного рішення. Водночас у роботі не враховано вплив застосування СТАТКОМ на процес відновлення ізоляційного проміжку, що є критично важливим для безпечного і надійного повторного включення лінії. Відсутність такого аналізу обмежує повноту оцінки запропонованого технічного заходу. Рекомендується доповнити розділ дослідженням впливу СТАТКОМ на відновлення ізоляції та можливі наслідки для режимів ОАПВ.

4. У розділі 5 відсутній аналіз співвідношень між довжиною ПЛ та кількістю груп шунтувальних реакторів, які могли б призвести до паралельного резонансу. У контексті застосування КШР такий факт є важливим, бо ускладнює сприйняття практичної цінності моделі.

5. У пункті 6.3 основна увага приділена лише моменту комутації ненавантаженого автотрансформатора. При цьому не розглянуто інші фактори, які також істотно впливають на виникнення та характеристики резонансних перенапруг (наприклад, значення параметрів ПЛ та довжина лінії). Крім того, не враховано взаємну кореляцію між факторами, яка в реальних умовах може суттєво змінювати характер перехідного процесу. Це знижує комплексність аналізу та може обмежити практичну застосовність запропонованих висновків.

6. У розділі 6, пунктах 6.2 та 6.3, обґрунтовано застосування послідовно передвмикнених активних опорів до елегазових вимикачів для придушення резонансних перенапруг при комутації ненавантажених автотрансформаторів та аперіодичної складової струму при комутаціях компенсованих шунтувальними реакторами ліній електропередавання надвисокої напруги. Водночас у роботі не висвітлено недоліки такого заходу, зокрема необхідність додаткових компонентів для монтажу, що може ускладнювати експлуатацію та збільшувати капітальні витрати. Для повнішої оцінки доцільності використання рекомендовано врахувати ці аспекти та порівняти їх із альтернативними рішеннями.

7. В роботі мало присвячено уваги розвитку інформаційного забезпечення керування режимами МЕМ, зокрема такого, що забезпечувало б більш глибоку цифрову трансформацію і залучення нетрадиційних джерел електроенергії, які структуруються на сьогодні в локальні електроенергетичні системи і являються елементом децентралізації генерування.

8. Щодо загальної оцінки змісту, структури та оформлення результатів роботи. У роботі зустрічаються граматичні помилки, стилістичні неточності і описки, але кількість їх допустима. Путаються деякі поняття: «величина» і «значення», «генерація» і «генерування», тощо. Вживається «при» там, де потрібно «під час» або «коли».

Проте зазначені зауваження не є принциповими і такими, що піддають сумніву результати досліджень. Вони не впливають на загальну позитивну оцінку дисертаційної роботи Кучанського В.В. Розглянувши звіт подібності за результатами перевірки дисертаційної роботи на текстові співпадіння, можна зробити висновок, що дисертаційна робота Кучанського В.В. є результатом самостійних досліджень і не містить елементів фальсифікації, компіляції, фабрикації, плагіату та запозичень. Використані ідеї, результати і тексти інших авторів мають належні посилання на відповідне джерело.

Висновок

Дисертація Кучанського Владислава Володимировича є завершеною науково-прикладною працею, в якій отримано нові науково-обґрунтовані результати, що присвячені вирішенню актуальної проблеми розвитку теорії і засобів розроблення нових моделей та методів аналізу і управління режимами роботи магістральних електричних мереж за умов структурної несиметрії для підвищення надійності та ефективності їхнього функціонування. Дисертаційна робота за актуальністю теми, обґрунтованістю та достовірністю наукових положень, новизною досліджень і практичною цінністю отриманих результатів відповідає вимогам пп. 7, 8, 9 «Порядку присудження та позбавлення наукового ступеня доктора наук», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 17 листопада 2021 р. № 1197, а її автор Кучанський Владислав Володимирович заслуговує на присудження наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.14.02 – електричні станції, мережі і системи.

Професор кафедри електричних станцій та систем
Вінницького національного технічного університету,
доктор технічних наук, професор


Петро ЛЕЖНЮК

Учений секретар Вченої ради ВНТУ,
кандидат технічних наук, доцент


Інна ВІШТАК

