

УДК 621.311.1

DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2019.54.019>

## РОЗРОБКА МЕТОДІВ І МОДЕЛЕЙ АНАЛІЗУ АНОРМАЛЬНИХ РЕЖИМІВ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ З МЕТОЮ ЇХ ОПТИМІЗАЦІЇ

**В.Г. Кузнецов\***, чл.-кор. НАН України, **Ю.І. Тугай\*\***, докт. техн. наук, **В.І. Кошман\*\*\***, канд. техн. наук, **В.В. Кучанський\*\*\*\***, канд. техн. наук, **Л.Р. Сабарно\*\*\*\*\***, канд. техн. наук, **І.Ю. Тугай\*\*\*\*\***, канд. техн. наук, **О.Г. Шполянський\*\*\*\*\***, канд. техн. наук, **Д.А. Нікішин\*\*\*\*\***

Інститут електродинаміки НАН України,  
пр. Перемоги, 56, Київ, 03057, Україна  
e-mail: [tugay@ied.org.ua](mailto:tugay@ied.org.ua)

*Розглянуто особливості оптимізації аномальних режимів електричних мереж різного рівня ієрархії з метою підвищення надійності, ефективності та якості електропостачання. Особливу увагу приділено несиметричним режимам, в яких параметри сягають небезпечних екстремальних значень. Уточнено моделі електричних мереж та їх елементів з урахуванням особливостей сучасного обладнання та схем побудови. Розроблено нові методи аналізу в умовах наявності в електричних мережах джерел спотворень параметрів режиму. Запропоновано до реалізації засоби корекції та нормалізації аномальних режимів. Досліджено особливості роботи засобів протиаварійної автоматики за наявності в електричній мережі джерел розосередженої генерації. Реалізація розроблених методів та моделей дасть змогу електричним мережам забезпечити виконання постійно зростаючих вимог до електропостачання сучасних і перспективних споживачів. Бібл. 12.*

**Ключові слова:** електричні мережі, моделювання, аномальний режим, резонансні перенапруги, аперіодична складова, джерела розосередженої генерації.

Сучасні електричні мережі (ЕМ) є високотехнологічними системами з багаторівневою ієрархічною структурою. Кожний елемент ЕМ має свої характеристики електромагнітного поля й обмеження, які в сукупності визначають поведінку мережі в цілому, причому в ній внаслідок об'єктивних тенденцій розвитку постійно підсилюється взаємозв'язок і взаємозумовленість процесів. Опис цих процесів, їх моделювання й пошук оптимальних рішень є предметом фундаментальних досліджень і потребує залучення складного математичного апарату, засобів фізичного й математичного моделювання, сучасних методів аналізу і обчислювальних процедур.

Першочергова вимога до електропостачання – його надійність. Критерій надійності енергозабезпечення залишається основним і в аспекті визначення оптимального режиму роботи електричних мереж. Але слід також пам'ятати, що електроенергія є особливим видом продукції, транспортування якої виконується за рахунок витрат деякої частини самої продукції. І втрати електроенергії під час її передачі й розподілу є неминучими. У той же час їх значення має велику чутливість до змін параметрів режиму, що надає цьому критерію певний пріоритет у разі комплексної оптимізації в ЕМ. Також суттєвим, особливо для споживача, лишається критерій якості електроенергії. Проблема її забезпечення пов'язана з визначенням граничних значень параметрів для зони оптимального режиму в ЕМ [1].

За традиційної постановки задачі оптимізації розглядають тільки нормальні усталені режими, з розрахунку на які було побудовано електричну мережу. Відомо, що багатозафазна система ефективно функціонує тільки тоді, коли всі її ланки симетричні та лінійні, а режим – стабільний. Тому ці вихідні положення було покладено в основу всіх методів оптимізації режимів, які традиційно використовувались для вибору законів керування. Однак у сучасних умовах, у зв'язку з появою й поширенням нових технологічних процесів та систем і, як на-

© Кузнецов В.Г., Тугай Ю.І., Кошман В.І., Кучанський В.В., Сабарно Л.Р., Тугай І.Ю., Шполянський О.Г., Нікішин Д.А., 2019

ORCID ID: \* <https://doi.org/0000-0002-5399-2942>, \*\* <https://doi.org/0000-0002-0704-1863>,

\*\*\* <https://doi.org/0000-0001-6473-9478>, \*\*\*\* <https://doi.org/0000-0002-8648-7942>,

\*\*\*\*\* <https://doi.org/0000-0002-2153-2183>, \*\*\*\*\* <https://doi.org/0000-0002-7261-4277>,

\*\*\*\*\* <https://doi.org/0000-0002-0167-2234>

слідок, безперервним зростанням питомої ваги несиметричних, нелінійних і динамічних споживачів електроенергії, умови функціонування ЕМ все більшою мірою відрізняються від нормальних, проектних. Змінюються також параметри елементів і самої електричної мережі, оскільки відбувається процес технічного переоснащення та модернізації основного обладнання. У разі досягнення критичних відхилень значень параметрів можна говорити про виникнення аномального режиму, для якого використання традиційних методів оптимізації буде неадекватним, а значить, і неефективним.

Предметом наукових досліджень за темою «Розробка методів і моделей аналізу резонансних процесів та мінімізації втрат електроенергії в несиметричних режимах роботи електричних мереж» («Безпека-3», 2014-2018 рр.) було, зокрема, попередження перенапруг як однієї з основних причин виходу з ладу обладнання, що трапляється в ЕМ [2]. Резонанс – явище, яке порівняно часто зустрічається в ЕМ, оскільки в них завжди присутні ємнісні та індуктивні елементи, здатні до коливального обміну енергією. На відміну від комутаційних перенапруг, що з'являються в результаті відключень чи підключень обладнання і тривають соті частки секунди, резонансні виникають непередбачено і можуть існувати порівняно тривалий час. Згідно з нормами Міжнародного стандарту резонансні перенапруги мають бути обмежені шляхом застосування спеціальних заходів. Ці перенапруги не мають братися до уваги під час визначення параметрів обмежувачів перенапруг (ОПН) та вибору ізоляції, оскільки традиційні захисні заходи не є достатніми для попередження ушкоджень обладнання внаслідок резонансних процесів [3].

Заходи захисту силового устаткування від резонансних перенапруг мають бути ефективними як за оперативних переключень, так і за автоматичних відключень. Вони мають або запобігати виникненню резонансного процесу (змінювати еквівалентні параметри заступних схем устаткування), або з високим ступенем швидкодії виявляти його початок та придушувати збуджуючу силу (робити коливання згасаючими).

У результаті проведеного критичного аналізу відомих моделей і методів аналізу режимів ЕМ з ефективним заземленням нейтралі було розроблено вимоги щодо засобів дослідження аномальних режимів з урахуванням можливості виходу значень окремих параметрів за припустимі межі. Для кожного з розглянутих аномальних режимів визначено умови збереження функціональності системи та заходи забезпечення виконання цих умов.

Було вдосконалено моделі магістральних ліній електропередачі (ЛЕП) надвисокої напруги (НВН) та великої довжини, зокрема для ліній, які йдуть в одному коридорі. Дослідження показали, що вплив наближених ліній на власні ємності та індуктивності є відчутним лише для нульових послідовностей. Ємності та індуктивності прямої послідовності за наявності наближеної ЛЕП майже не змінюються. У той же час наявність наближеної лінії призводить до зменшення частоти власних коливань резонансного кола відносно відключеної фази ЛЕП. Якщо зближення ЛЕП відбувається на всій їх довжині з мінімально припустимою відстанню між крайніми фазами, то зсув резонансної частоти складає близько 0,25 Гц. Це явище може бути корисним з огляду на попередження перенапруг у паузі однофазного автоматичного повторного включення (ОАПВ), якщо резонансна частота відповідної одиночної лінії не перевищує 50 Гц. В іншому випадку може відбутися зближення частоти власних коливань контуру і частоти вимушених коливань струму ЕМ, що підвищить небезпеку виникнення резонансних перенапруг.

Досліджено вплив на характер розвитку аномальних режимів такого засобу боротьби з несиметрією, як транспозиція ЛЕП. При відстанях між крайніми фазами наближених ідеально транспонованих ЛЕП, що перевищують 80 м, їхні резонансні частоти збігаються з резонансною частотою одиночної ЛЕП. Однак навіть у цих випадках значення вхідних опорів їхніх резонансних контурів будуть мати різницю у 8–10 %, що за певних обставин може вплинути на вибір засобів для запобігання небезпечним резонансним перенапругам. Таким чином, наявність протяжних ділянок наближених ЛЕП навіть за ідеальної транспозиції фаз може суттєво впливати на частотні характеристики їхнього вхідного опору в паузі ОАПВ. Ступінь впливу залежить від наближеності частоти власних коливань утвореного контуру до

частоти ЕМ. Цей факт обов'язково має враховуватись при виборі заходів попередження виникнення резонансних перенапруг в аномальних режимах ЛЕП НВН [4].

Також у роботі було здійснено аналіз впливу ступеня компенсації зарядної потужності аномальних режимів ліній електропередачі надвисокої напруги на характер перетікання електромагнітних процесів у компенсованих лініях електропередачі залежно від ступеня компенсації зарядної потужності. Розглянуто заходи обмеження тривалості існування перенапруг в аномальних режимах та розроблено рекомендації щодо запобігання перетіканню аномальних режимів у аварійні.

Удосконалено методи та математичні моделі для дослідження аномальних перенапруг, які, на відміну від традиційних, дають змогу враховувати поперечну та поздовжню несиметрії ЛЕП НВН, а також умови комутації груп автотрансформаторів на електричних підстанціях, що підвищує адекватність моделювання процесів та обґрунтованість рекомендованих заходів попередження виникнення перенапруг цього типу.

Також виконано дослідження аномальних несиметричних режимів ЕМ за відсутності безпосереднього заземлення нейтралі. Здійснено аналіз протікання дугових перехідних процесів у таких мережах у режимах недостатньої компенсації, а також перекомпенсації ємностей на землю реакторами, що гасять дугу (ДГР). Встановлено, що в таких випадках, на відміну від випадку повної компенсації, ліквідація дугового замикання супроводжується коливальним процесом биття, обумовленим інтерференцією усталеної напруги промислової частоти та вільної складової настільки близької частоти, що вони не сприймаються як два роздільні коливання. Амплітуда коливань, які виникають у цьому разі, періодично збільшується чи зменшується в часі з частотою, рівною різниці частот коливань, які викликали інтерференцію. У разі биття кратності перенапруг на пошкодженій фазі складають 1,62...1,8, на непошкоджених – 1,5...2,0. У цьому випадку за високих значень пробивної напруги стає можливим режим багатократних пробіїв ослабленого місця.

Зниження перенапруг у мережі при розстроюванні ДГР, а також при його несиметричних режимах, що супроводжуються резонансними перенапругами, може досягатися шляхом застосування високоомного резистора, включеного паралельно ДГР. Правильний вибір резистора приводить до припинення биття напруг на фазах після згасання дуги і, як наслідок, до припинення пробіїв на пошкодженій фазі у випадку пробивної напруги ослабленого місця, більшої за фазну. Максимальна кратність перенапруг у таких мережах визначається першим замиканням і не перевищує 2,0...2,2 [5].

Досліджено протікання дугових перехідних процесів у разі використання одинарних і здвоєних струмообмежувальних реакторів. Встановлено, що хоч кратності перенапруг у схемах зі струмообмежувальними реакторами будуть меншими граничних 6–7 кратних, ймовірність більш високих дугових перенапруг у мережах все ж існує.

Дослідження перебігу перехідних процесів у разі відключення подвійних і двофазних коротких замикань (КЗ) на землю показали, що за таких перехідних процесів слід очікувати появи трикратних перенапруг, і, як наслідок, багатомісних пошкоджень ізоляції, наприклад, одразу декількох високовольтних двигунів чи кабелів (пошкоджень кінцевих кабельних муфт та інших місць з ослабленою ізоляцією). Як запобіжний захист від пошкодження в мережах 6–10 кВ високовольтних електродвигунів слід використовувати швидке селективне відключення однофазних замикань на землю (ОЗЗ) там, де це допустимо за умовами технологічного процесу. Забезпечити селективність можна на основі виконання резистивного заземлення нейтралі мережі (високоомного або низькоомного). Аналогічно відключенню подвійного замикання відбувається й відключення двофазних та трифазних КЗ на землю. Це пов'язано з тим, що існують розкиди ходу контактів, і струми у фазах відключаються неодноразовно, що приводить до послідовної зміни виду замикання в процесі відключення пошкодженого приєднання. Наприклад, під час відключення двофазного КЗ на землю гасіння струму в одній з фаз приводить до відновлення напруги на шині за наявності ОЗЗ у мережі (на непогашеній фазі), що аналогічно відключенню подвійного замикання [6].

У мережах напругою 6–10 кВ з малим активним опором, що живляться від трансформаторів великої потужності, для зменшення струмів КЗ застосовуються струмообмежувальні

реактори. У таких мережах у разі комутацій і пошкоджень можливе утворення двочастотних коливальних контурів і виникнення значних перенапруг внаслідок перехідного резонансу. Критеріями виникнення перехідного резонансу є приблизна рівність частот двох ізольованих контурів, які складають двочастотний контур, і значна різниця їхніх хвильових опорів. Обмежити перенапруги, що виникають у подібних ситуаціях, можна шляхом установлення ОПН на початку чи в кінці кабелю, але обов'язково за реактором, а не на шинах. Слід відзначити, що ОПН, встановлені на шинах, не забезпечать захисту обладнання.

У роботі набули свого подальшого розвитку математичні моделі і методи оцінки електромагнітної сумісності та методи аналізу й оптимізації режимів в умовах спотворення якості електроенергії. Розроблено математичні моделі для різних видів електротехнічного обладнання, які дозволяють визначати додаткові втрати активної потужності та температури додаткового перегріву від несиметрії та несинусоїдальності напруг.

Шляхом аналізу фізичних процесів отримано залежності активних опорів елементів мережі від спотворень якості електроенергії. Розроблено моделі для визначення еквівалентних опорів елементів мережі 35–220 кВ, які враховують зростання опорів за одночасного впливу несинусоїдальності та несиметрії напруг. Запропоновано методику представлення показників якості електричної енергії у вигляді нечітких чисел та інтервалів. Розроблено модель для векторної оптимізації втрат електричної енергії та підвищення її якості з урахуванням невизначеності вихідної інформації та значень цільових функцій. Підтверджено, що найменші втрати електричної енергії будуть спостерігатись у схемі з активних опорів, коли фізичний принцип найменшої дії реалізується відносно розсіювання активної потужності в елементах мережі. У той же час зроблено висновок, що неоднорідність є внутрішнім фактором ЕМ, тому її компенсацію доцільно виконувати введенням додаткових електрорушійних сил (ЕРС) у замкнені ланцюги схеми.

Тензорний підхід до аналізу режимів ЕМ дав змогу розробити метод визначення ЕРС нормалізації, який визначає необхідний вплив на внутрішні, а не на зовнішні параметри ЕМ, як це традиційно прийнято, через зміну струмів розімкнених ланцюгів [7]. Виконано алгоритмічну та програмну реалізацію методу для моделювання режимів ЕМ високої напруги сучасного рівня складності. Знайдені значення ЕРС на практиці можуть бути реалізовані для оптимізації режимів ЕМ з незаземленою нейтраллю, причому запропонований метод, на відміну від існуючих, надає можливість враховувати реальні напруги джерел живлення мережі, а також обирати закон регулювання [8].

На базі математичної моделі неоднорідної ЕМ отримано значення необхідних коефіцієнтів трансформації в поздовжньо-поперечних регуляторах автотрансформаторів підстанцій надвисокої напруги для характерних режимів енергосистеми, що підвищує достовірність рішень під час керування режимом [9]. Спрямоване на нормалізацію керування системними потоками енергії дає змогу знизити втрати енергії на 9...11 %. Отримали подальший розвиток теоретичні принципи ефективного використання ліній електропередачі з підсиленням електромагнітним зв'язком між фазами. Розроблений засіб нормалізації режиму складних ієрархічних мереж відрізняється від відомих ліній FACTS меншою вартістю, більшою надійністю та екологічністю. Так, очікувана економія капітальних вкладень становить 10...30 % при перерахуванні на одиницю потужності. Спостерігаємо збільшення в 2...4 рази густини потоку потужності через поперечний переріз лінії, зниження екологічного впливу завдяки зменшенню максимальної величини напруженості електричного поля під лініями на 15...40 % і майже подвійне скорочення площі земельних угідь, відчуваних під будівництво ліній електропередачі.

Результати роботи було впроваджено:

– у мережах напругою 10 кВ АТ «Харківобленерго»: рекомендації щодо запобігання резонансних процесів у неповнофазних режимах роботи елементів систем електропостачання з ізольованою нейтраллю; моделі аналізу втрат електричної енергії в системах електропостачання з урахуванням показників якості електроенергії; засоби пошуку оптимальних квазістаціонарних аномальних режимів у розподільних ЕМ з урахуванням взаємодії мереж різного рівня;

– у системі електропостачання ПАТ «Азот»: визначення умов виникнення резонансних процесів у системах електропостачання з компенсуючими пристроями та джерелами кондуктивних завад; методика визначення додаткових втрат у елементах системи електропостачання за наявності несинусоїдальних спотворень; модель визначення втрат електричної енергії в системах електропостачання з урахуванням її якості;

– у проектній організації ТОВ «ЕНКОР ПЛЮС»: імітаційна модель для аналізу електромагнітних комутаційних перехідних процесів за неповнофазного режиму роботи груп шунтувальних реакторів та автотрансформаторів; методика визначення граничних значень довжини ліній електропередачі надвисокої напруги, що небезпечні з точки зору можливого виникнення резонансних перенапруг.

Використання зазначених результатів роботи дало змогу підвищити достовірність інформації про стан мереж, запобігти появі аварійних процесів, скоротити втрати електричної енергії та підвищити її якість, а також покращити умови безпеки персоналу і постачання електроенергії населенню.

Подальше використання результатів роботи пропонується в організаціях, що займаються проектуванням (інститут «Енергомержпроект», фірми-проектанти систем електропостачання) та експлуатацією ЕМ (ДП «НЕК «Укренерго», акціонерні обленерго), з метою попередження розвитку аварійних процесів внаслідок аномальних перенапруг, а також втрат електричної енергії та підвищення її якості. За результатами досліджень було опубліковано 67 робіт, отримано 2 патенти.

*Фінансується за держбюджетною темою «Розробка методів і моделей аналізу резонансних процесів та мінімізації втрат електроенергії в несиметричних режимах роботи електричних мереж» (шифр «Безпека-3»), яка виконувалася за Постановою Бюро ВФТПЕ НАНУ від 15.10.2013 р, протокол № 14. Державний реєстраційний номер роботи 0114U001465.*

Дослідження з нормалізації режимів ЕМ здійснювались також під час виконання робіт за темою: **«Підвищення надійності виконання комутацій в компенсованих магістральних лініях електропередачі надвисокої напруги»** в рамках Цільової комплексної програми наукових досліджень НАНУ “Науково-технічні основи енергетичного співробітництва між Україною та Європейським Союзом” (“Об’єднання-3”) у 2016-2018 рр. Мета роботи полягала у виявленні характеру протікання електромагнітних процесів у компенсованих магістральних лініях електропередачі, встановленні причин можливого виникнення аварійних режимів, розробці заходів та рекомендацій для їх запобігання.

Слід відзначити, що процес модернізації магістральних ЕМ України шляхом поступової заміни застарілих масляних та повітряних вимикачів на сучасні елегазові, який здійснюється останнім часом, показав, що поряд з отриманням очевидних переваг у результаті такої заміни виникає також небезпека появи непередбачуваних аварійних режимів. Так, за певних умов відбувається пошкодження основних контактів і руйнування дугогасильних камер. Як наслідок, відбувається відключення потужних магістральних ліній електропередачі надвисокої напруги, які з’єднують окремі частини енергосистеми та забезпечують видачу потужності атомними електростанціями (АЕС). Таке руйнування пов’язано з особливостями фізичних процесів, що відбуваються в їхніх дугогасильних камерах за різного роду комутацій, які впливають на умови експлуатації не тільки самих вимикачів, але й електричної ізоляції комутуваного електрообладнання. Тому підвищення надійності виконання комутацій у компенсованих магістральних лініях ЛЕП НВН є актуальною науковою та технічною задачею [10].

За результатами досліджень удосконалено та реалізовано в середовищі MATLAB&Simulink математичну модель ЛЕП НВН, яка, на відміну від традиційних, враховує динамічну зміну параметрів елементів передачі та дає можливість програмування процесу виконання комутації елегазового вимикача. Це дало змогу виконати ретельний, без істотних спрощуючих припущень аналіз електромагнітних процесів у ЛЕП НВН як в нормальних, так і в аномальних режимах. Таким чином, отримано якісно нові результати досліджень і забезпечено гарантоване знаходження всіх можливих областей значень параметрів магістральних ЕМ, в яких зустрічаються небезпечні аномальні перенапруги та надструми.

Шляхом моделювання несиметричних режимів живлення ЛЕП НВН (при ОАПВ та в інших аномальних режимах) досліджено особливості появи небезпечних квазістаціонарних перенапруг резонансного характеру на ізоляції «фаза–земля» відключених фаз залежно від довжини ЛЕП та розміщення шунтувальних реакторів (ШР) на підстанціях та електростанціях. Навіть якщо напруга «фаза–земля» не несе особливої небезпеки, шляхом моделювання слід перевіряти напругу на поздовжній ізоляції вимикача лінії в умовах різних перехідних процесів, що супроводжують утворення неповнофазних режимів. Це дає змогу попередньо оцінити необхідність реалізації спеціальних заходів попередження небезпечних перенапруг.

Досліджено та рекомендовано для використання на практиці за неповнофазного режиму лінії перехід на кінцевих підстанціях з повнореакторного режиму в неповно-реакторний для однойменних фаз груп ШР, що дає змогу вивести ЛЕП НВН критичної довжини з резонансних умов та уникнути аномальних перенапруг під час безструмової паузи ОАПВ без застосування спеціальних заходів.

Доведено, що застосування компенсаційних реакторів (КР) – ефективний захід для зменшення не тільки струму підживлення дуги, але й розлагодження можливих резонансних кіл за неповнофазного режиму роботи ЛЕП НВН. Але ця можливість КР обмежена, оскільки його індуктивний опір не має перевищувати значення, що відповідає рівню ізоляції нейтрального відводу ШР. У мережах України цей відвід виконується на напругу 35 кВ, що навіть з урахуванням випробувальної напруги 80 кВ обмежує реактивну складову ШР значенням 300 Ом. Тому з метою розширення області використання даного засобу попередження перенапруг ізоляція нейтралі ШР має бути посилена. Рекомендовано в разі замовлення нових ШР обумовити в технічному завданні забезпечення ізоляції нейтралі, яка відповідає класу 110 кВ.

У процесі проектування та експлуатації магістральних ЕМ слід враховувати особливості роботи елегазових вимикачів на ЛЕП, що пов'язані з гасінням аперіодичних струмів. Особливу увагу слід приділяти лініям зі ступенем компенсації зарядної потужності більш ніж 0,6. У таких мережах по можливості слід уникати швидких циклів «увімкнення–вимкнення» (симетричних або несиметричних). Зокрема, у таких випадках слід звернути увагу на особливості конкретної реалізації релейним захистом циклу швидкого трифазного автоматичного повторного включення, в якому можливе пошкодження вимикача через аперіодичну складову струму. Рекомендовано також магістральним електричним мережам, що використовують як лінійні елегазові вимикачі, надати виробникам пропозиції щодо конструктивних доробок вимикачів, що дасть змогу надійно виконувати комутації ЛЕП НВН з високим ступенем компенсації ємності ліній ШР (імовірно, варто було б удосконалити конструкцію дугогасильної системи).

Для можливості перевірки надійної роботи елегазових вимикачів виробник повинен у технічній документації вказувати допустимі параметри аперіодичної складової в сумарному струмі: її рівень та інтервал часу, протягом якого миттєве значення сумарного струму має досягти нульового значення. Також слід зазначити, що налаштування пристрою керованої комутації елегазового вимикача має виконуватись за результатами моделювання перехідних процесів характерних режимів конкретної ЛЕП з одночасним контролем рівнів аперіодичних складових струмів. Для боротьби з аперіодичною складовою струму ЛЕП НВН з підключеними ШР, якщо її небезпека підтверджена розрахунками, найбільш простим заходом є відмова від комутації ЛЕП НВН з критичним числом реакторів у випадку, коли така можливість підтверджена відповідними розрахунками. В іншому разі слід передбачити додаткові технічні засоби щодо обмеження значення аперіодичної складової струму.

Досліджено можливість використання передвключеного резистора для запобігання існуванню аперіодичної складової в струмі елегазового вимикача. Доведено, що використання попереднього підключення резистора не супроводжується будь-якими небажаними наслідками для інших елементів електропередачі. Розрахунки показали, що значення опору цих резисторів має бути в 2–3 рази більшим, ніж для обмеження комутаційних перенапруг.

Для зменшення значення аперіодичних струмів доцільно використовувати відповідне налаштування блоків керованої комутації елегазових вимикачів, якщо результати моделювання процесів покажуть, що точність їх роботи є достатньою для умов конкретної ЛЕП

НВН. Але слід враховувати, що для боротьби з аперіодичною складовою струму блоки мають бути налаштовані на включення ЛЕП поблизу від максимального значення напруги, тим часом як у разі потреби обмеження комутаційних перенапруг блоки слід налаштовувати на включення ЛЕП поблизу від нульового значення напруги. Тому треба реалізувати компромісне налаштування за результатами моделювання для конкретних умов.

Розроблені моделі та методи впроваджено на підстанції ПС-750 кВ «Північно-українська» Північної магістральної електричної мережі, а також передано в ДП «НЕК «Укренерго» для використання в процесі проектування нових ЛЕП НВН.

Результати роботи відображено у 18 публікаціях у фахових виданнях України та за кордоном, в тому числі таких, що входять до наукометричних баз Scopus та Web of Science. Зроблено 9 доповідей на міжнародних науково-технічних конференціях.

*Фінансується за держбюджетною темою «Підвищення надійності виконання комутацій в компенсованих магістральних лініях електропередачі надвисокої напруги» в рамках Цільової комплексної програми наукових досліджень НАНУ “Науково-технічні основи енергетичного співробітництва між Україною та Європейським Союзом” (шифр “Об’єднання-3”), яка виконувалась за постановами Президії НАН України від 30.12.2015 № 311, 20.01.2016 № 12 та розпорядженнями Президії НАН України від 25.03.2016 № 180 від 02.02.2017 № 99, 01.02.2018 № 69. Державний реєстраційний номер роботи 0116U006587.*

Важливим засобом забезпечення надійності електропостачання за аномальних режимів є протиаварійна автоматика. Тому подальшому удосконаленню цих засобів була присвячена науково-дослідна робота «Дослідження аварійних режимів роботи ЕМ для розробки протиаварійної автоматики», що виконувалася в рамках прикладної тематики «**Дослідити режими та створити засоби протиаварійного керування завантаженням перетинів енергосистем зі значною часткою відновлюваних джерел енергії**» (“Монітор-ПК”, 2016-2018 рр.). Метою цієї роботи було дослідження неповнофазних режимів роботи мереж із джерелами розподіленої генерації (ДРГ), ефективності роботи систем релейного захисту та розробка заходів і засобів підвищення надійності та безаварійності таких мереж [11].

Впровадження розподіленої генерації в енергетику України має безсумнівні переваги, але одночасно створює низку проблем, у тому числі з належним функціонуванням релейного захисту і автоматики (РЗА). За рахунок частоті зміни схеми живлення змінюються значення струмів КЗ, що призводить до хибних спрацьовувань і порушень узгодженості дії пристроїв РЗА. Розподілена генерація може стати причиною збільшення і зменшення зон дії РЗА, порушення селективності й перерв у електропостачанні споживачів. На рівні розподільчої мережі стає можливим багатостороннє живлення місця пошкодження, з’являються нові, раніше нехарактерні види збурень і аварій, змінюються характеристики електромагнітних і електро-механічних перехідних процесів. Проблеми під час побудови і налаштування РЗА істотно розширюються і ускладнюються. Проведений аналіз публікацій показав, що параметри заступних елементів існуючих моделей мереж не відповідають параметрам реального електрообладнання, а також відсутні моделі пристроїв струмового захисту, які б дали змогу інтегрувати їх з розробленими в середовищі MATLAB&Simulink моделями ЕМ.

Особливості джерел розподіленої генерації (ДРГ) обумовили детальне вивчення їхніх властивостей і характеристик, розробку відповідних математичних моделей роботи в різних режимах [12]. Водночас було удосконалено методи аналізу режимів роботи систем електропостачання, що враховують особливості ДРГ, їхньої надійності, стійкості тощо. Також поставлено і вирішено задачі дослідження неповнофазних режимів роботи мереж з ДРГ, а також розробки заходів і засобів підвищення надійності та безаварійності таких мереж. Було досліджено виникнення неповнофазних режимів за різних варіантів роботи мереж з ДРГ та запропоновано як інформативний параметр виникнення таких режимів використовувати або відношення струмів зворотної та прямої послідовностей, або відношення умовної потужності зворотної послідовності та повної потужності навантаження. Проведені дослідження роботи мереж з різним режимом заземлення нейтралі підтвердили доцільність впровадження резистивного заземлення нейтралі.

Дослідження перенапруг, що виникають під час підключення/відключення автономного генератора до шин підстанції, дали змогу встановити, що уникнення небезпечних перенапруг у мережах генераторної напруги автономної електричної станції за однофазних дугових замикань досягається шляхом високоомного заземлення нейтралі генератора. У мережах генераторної напруги ОПН слід встановлювати безпосередньо на виводах генератора. У разі заземлення нейтралі генератора через високоомний резистор величиною 6,5 кОм характеристики ОПН вибираються, виходячи з необхідного рівня обмеження перенапруг, що виникають при «грубій» синхронізації генераторів. У випадку оснащення автономних електричних станцій вакуумними вимикачами швидкість відновлення електричної міцності міжконтактного проміжку у вакуумній дугогасильній камері має забезпечувати відсутність повторних запалювань, що спричиняють неприпустимо великі кратності виткових перенапруг. Цій умові при випередженні моменту початку розходження контактів перед моментом проходження струму промислової частоти, що відключається, через нульове значення порядку 300 мкс відповідає швидкість відновлення електричної міцності міжконтактного проміжку не менш ніж 60–80 кВ/мс.

Встановлено, що в ЕМ з ДРГ зміни режимів роботи джерел і зміни схеми живлення призводять до помилкових спрацьовувань і порушення узгодженості дій пристроїв РЗА. Оскільки у таких мережах не передбачена адаптація налаштувань РЗА, за умови виникнення пошкоджень для підтримання функціонування мережі відключаються всі джерела ДРГ. Це допомагає відновити структуру радіальної розподільчої мережі й узгоджену дію пристроїв РЗА, однак у такому разі відключаються споживачі, що безпосередньо живляться від джерел ДРГ. Отримані результати свідчать про необхідність розробки пристроїв захисту, адаптивних до змін режимів роботи й експлуатаційних параметрів мережі.

Основні результати роботи, а саме рекомендації щодо запобігання неповнофазним режимам у мережах з розподіленою генерацією, щодо уникнення перенапруг під час підключення до шин підстанції автономного генератора та його відключення, а також модель універсальної адаптивної системи струмових захистів розподільчих мереж з розподіленою генерацією впроваджено у АТ «Харківобленерго». Подальше використання результатів роботи пропонується в організаціях, що займаються проектуванням та експлуатацією ЕМ, з метою попередження розвитку аварійних процесів внаслідок перенапруг, неповнофазних режимів, а також неправильних дій пристроїв релейного захисту. Результати роботи відображено в 16 публікаціях у фахових виданнях України, отримано 1 патент.

*Фінансується за держбюджетною темою «Дослідити режими та створити засоби протиаварійного керування завантаженням перетинів енергосистем зі значною часткою відновлюваних джерел енергії» (шифр “Монітор-ПК”) за Постановою Бюро ВФТПЕ НАНУ від 07.07.2015, протокол № 11. Державний реєстраційний номер роботи 0115U004417.*

**Висновки.** 1. Визначено засади, здійснено розвиток теорії, розроблено математичні моделі й методи для дослідження аномальних режимів у електричних мережах, які виникають під дією зовнішніх факторів спотворень та в результаті змін внутрішньої структури. Отримані результати в сукупності є теоретичним узагальненням та новим вирішенням важливої для електроенергетики науково-прикладної проблеми поліпшення надійності та ефективності електропостачання на основі спеціальних заходів, які ґрунтуються на розроблених моделях і методах аналізу.

2. Удосконалено методи та математичні моделі для дослідження аномальних перенапруг, які, на відміну від традиційних, дають змогу враховувати поперечну та повздовжню несиметрії ЛЕП НВН, а також умови комутації груп автотрансформаторів на електричних підстанціях, що підвищує адекватність моделювання процесів та обґрунтованість рекомендованих заходів попередження виникнення аномальних перенапруг. Розроблено моделі ЛЕП НВН, що йдуть на місцевості в одному коридорі. Використання реальних значень параметрів заступних схем дало змогу виявити небезпеку виникнення перенапруг з урахуванням зсуву резонансної частоти.



3. Також виконано дослідження аномальних несиметричних режимів розподільних ЕМ середньої напруги. Виконано аналіз протікання дугових перехідних процесів у таких мережах у режимах недостатньої компенсації, а також перекомпенсації ємностей на землю ДГР. Встановлено, що у таких випадках, на відміну від випадку повної компенсації, ліквідація дугового замикання супроводжується коливальним процесом биття, обумовленим інтерференцією усталеної напруги промислової частоти та вільної складової близької частоти.

4. Розроблено моделі роботи ЕМ з ДРГ за наявності пристроїв РЗА. Вони дають змогу перевіряти розраховані уставки і характеристики спрацьовування, а також виявляти режими, що призводять до їхніх неправильних дій. Результати імітаційного моделювання аварійних режимів роботи мережі (трифазне КЗ, двофазне КЗ і ОЗЗ) за незмінної напруги мережі показали, що модель працює коректно, режими і часові характеристики відповідають реальним режимам роботи і характеристикам пристроїв РЗА. Запропонована система адаптації уставок суттєво підвищує надійність роботи ЕМ та може бути інтегрована з сучасними мікропроцесорними пристроями РЗА.

1. Кузнецов В.Г., Тугай Ю.І., Шполянський О.Г., Тугай І.Ю. Використання динамічних та нечітких математичних моделей при аналізі якості електричної енергії. *Праці Інституту електродинаміки Національної академії наук України*. 2014. Вип. 38. С. 130–136.
2. 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.
3. 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.
4. Тугай Ю.І., Ганус О.І., Старков К.О. Комутаційні перенапруги у трансформаторах напруги. *Технічна електродинаміка*. 2016. № 5. С. 73–75.
5. Кошман В.І., Сабарно Л.Р., Севастюк І.М. Пристрій захисту розподільної електричної мережі від обриву проводу. *Праці Інституту електродинаміки Національної академії наук України*. 2015. Вип. 40. С. 44–48.
6. Сабарно Л.Р., Кошман В.І., Севастюк І.М. Дослідження дугових перенапруг у випадку одно- і двофазних замикань на землю у розподільній мережі з ізольованою нейтраллю. *Енергетика та комп'ютерно-інтегровані технології в АПК*. 2017. № 1(6). С. 17–21.
7. Тугай Ю.І. Нормалізація режимів електричних мереж при паралельній роботі. *Праці Інституту електродинаміки Національної академії наук України*. 2015. Вип. 40. С. 10–14.
8. Кузнецов В.Г., Тугай Ю.І., Нікішин Д.А. Оптимізація режимів сучасних систем електропостачання АПК. *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка*. 2015. Вип. 164. С. 44–45.
9. Тугай Ю.І., Демов О.Д., Нікішин Д.А., Півнюк Ю.Ю. Декомпозиція електричних мереж при оптимізації реактивних потужностей. *Праці Інституту електродинаміки Національної академії наук України*. 2018. Вип. 50. С. 11–15.
10. Кузнецов В.Г., Тугай Ю.І., Шполянський О.Г. Аналіз передумов пошкодження елегазових вимикачів у електричних мережах 750 кВ. *Праці Інституту електродинаміки Національної академії наук України*. 2017. Вип. 47. С. 16–22.
11. Тугай Ю.І., Нікішин Д.А., Гай А.В. Статистична модель для аналізу надійності систем електропостачання. *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка*. 2018. Вип. 195. С. 7–8.
12. Козирський В.В., Тугай І.Ю., Тютюнник Ф.О. Про використання тензорного аналізу в задачах визначення запасу статичної стійкості електричних систем за наявності джерел розподіленої генерації. *Праці Інституту електродинаміки Національної академії наук України*. 2018. Вип. 50. С. 23–27.

УДК 621.311.1

#### РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ И МОДЕЛЕЙ АНАЛИЗА АНОМАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ С ЦЕЛЬЮ ИХ ОПТИМИЗАЦИИ

**В.Г. Кузнецов**, чл.-корр. НАН Украины, **Ю.И. Тугай**, докт. техн. наук, **В.И. Кошман**, канд. техн. наук, **В.В. Кучанский**, канд. техн. наук, **Л.Р. Сабарно**, канд. техн. наук, **И.Ю. Тугай**, канд. техн. наук, **А.Г. Шполянский**, канд. техн. наук, **Д.А. Никишин**

Институт электродинамики НАН Украины,  
пр. Победы, 56, Киев, 03057, Украина

*Рассмотрена оптимизация аномальных режимов электрических сетей различного уровня иерархии с целью повышения надежности, эффективности и качества электроснабжения. Особое внимание уделено несимметричным режимам, в которых параметры достигают опасных экстремальных значений. Выполнено уточнение моделей электрических сетей и их элементов с учетом особенностей современного оборудования и схем. Раз-*

работаны новые методы анализа для условий наличия в электрических сетях источников искажений. Предложены средства коррекции и нормализации аномальных режимов. Исследованы особенности работы средств противоаварийной автоматики при наличии в электрической сети источников рассредоточенной генерации. Реализация разработанных методов и моделей позволит электрическим сетям обеспечить выполнение постоянно растущих требований к электроснабжению современных и перспективных потребителей. Библ. 12.

**Ключевые слова:** электрические сети, моделирование, аномальный режим, резонансные перенапряжения, аperiodическая составляющая, источники рассредоточенной генерации.

## DEVELOPMENT OF METHODS AND MODELS OF ANALYSIS OF ABNORMAL MODES OF ELECTRIC NETWORKS WITH THE AIM OF THEIR OPTIMIZATION

V. Kuznetsov, Yu. Tugay, V. Koshman, V. Kuchansky, L. Sabarno, I. Tugai, O. Shpolyansky, D. Nikishin

Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine,

pr. Peremohy, 56, Kyiv, 03057, Ukraine

The optimization of abnormal modes of electric networks of different levels of the hierarchy is considered in order to increase the reliability, efficiency and quality of electricity supply. Particular attention is paid to asymmetric regimes in which parameters reach dangerous extreme values. The models of electric networks and their elements have been specified, taking into account the features of modern equipment and circuits. New methods of analysis have been developed for the sources of distortions in electrical networks. The means for normalization of abnormal regimes have been proposed. The peculiarities of the work of means of emergency automation with the presence of distributed generation sources in the electric network are investigated. Implementation of the developed methods and models will allow electric networks to ensure the fulfillment of constantly increasing demands for the supply quality of modern and promising consumers. References 12.

**Key words:** electric networks, simulating, abnormal mode, resonance overvoltage, aperiodic component, sources of dispersed generation.

1. Kuznetsov V.G., Tugay Yu.I., Shpolyansky O.G., Tugai I.Yu. Using of dynamic and fuzzy mathematical models in the analysis of the quality of electric energy. *Pratsi Instytutu Electrodynamicy Natsionalnoi Akademii Nauk Ukrainy*. 2014. No 38. P. 130–136. (Ukr)
2. Kuznetsov V.G., Tugay Yu.I., Kuchansky V.V., Likhvid Y.G., Melnichuk V.A. Resonant overvoltages in the non-sinusoidal mode of the main electrical network. *Electrical engineering and electromechanics*. 2018. No 2. Pp. 69–73. (Ukr)
3. Kuznetsov V.G., Tugay Yu.I., Kuchansky V.V. Influence of the corona discharge on the multiplicity of internal overvoltages in main electrical networks. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2017. No 6. Pp. 55–60. (Ukr.)
4. Tugai Yu.I., Ganus O.I., Starkov K.O. Switching overvoltages in voltage transformers, *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2016. No. 5. Pp. 73–75. (Ukr)
5. Koshman V.I., Sabarno L.R., Sevastyuk I.M. Device for protection of the distribution network from the breakdown of the wire. *Pratsi Instytutu Electrodynamicy Natsionalnoi Akademii Nauk Ukrainy*. 2011. No 40. Pp. 44–48. (Ukr)
6. Sabarno L.R., Koshman V.I., Sevastyuk I.M. Investigation of arc overvoltage in the case of single- and two-phase earth faults in a distributive network with isolated neutral *Power engineering and computer-integrated technologies in the APC*. 2017. No 1 (6). Pp. 17–21. (Ukr)
7. Tugay Yu.I. Normalization of modes of electric networks in parallel work. *Pratsi Instytutu Electrodynamicy Natsionalnoi Akademii Nauk Ukrainy*. 2015. No 40. Pp. 10–14. (Ukr)
8. Kuznetsov V.G., Tugay Yu.I., Nikishin D.A. Optimization of modes of modern power supply systems of the AIC. *Bulletin of the Kharkov National Technical University of Agriculture*. 2015. No 164. Pp. 44–45. (Ukr)
9. Tugay Yu.I., Demov O.D., Nikishin D.A., Pivenyuk Yu.Yu. Decomposition of electric networks in optimization of reactive capacities. *Pratsi Instytutu Electrodynamicy Natsionalnoi Akademii Nauk Ukrainy*. 2018. No 50. Pp. 11–15. (Ukr)
10. Kuznetsov V.G., Tugay Yu.I., Shpolyansky O.G. Analysis of the preconditions of damage to SF6 circuit breakers in 750 kV electrical networks. *Pratsi Instytutu Electrodynamicy Natsionalnoi Akademii Nauk Ukrainy*. 2017. No 47. Pp. 16–22. (Ukr)
11. Tugay Yu.I., Nikishin D.A., Guy A.V. Statistical model for reliability analysis of power supply systems. *Herald of the Kharkov National Technical University of Agriculture*. 2018. No 195. Pp. 7–8. (Ukr)
12. Kozyrsky V.V., Tugay I.Yu., Tyutyunnik F.O. About the use of tensor analysis in problems of determining the reserve of static stability of electric systems in the presence of sources of distributed generation. *Pratsi Instytutu Electrodynamicy Natsionalnoi Akademii Nauk Ukrainy*. 2018. No 50. Pp. 23–27. (Ukr)

Надійшла 22.08.2019

Received 22.08.2019