**РЕФЕРАТ**

**наукової праці**

**«Заходи та засоби підвищення надійності та якості електропостачання, а також зменшення втрат електроенергії в електроенергетичних системах з відновлюваними джерелами енергії»**

**авторів Кучанського В.В., Нестерка А.Б., Гунько І.О.**

Розподільні електричні мережі функціонально були призначені для транспортування і розподілення електроенергії, виробленої централізовано на крупних електростанціях. З розбудовою в них нетрадиційних і відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) вони набувають рис локальної електро- енергетичної системи (ЛЕС). В зв’язку з цим виникають нові задачі: узгодження графіків навантаження споживачів і генерування ВДЕ з врахуванням їх нестабільності, оптимальне керування потоками потужності з метою зменшення втрат електроенергії і покращання її якості, забезпечення балансової надійності електроенергії в ЛЕС, що формується централізованим і місцевим генеруванням, тощо. Особливістю розподіленого генерування є те, що воно складається з відносно невеликих за потужністю електричних станцій, розосереджених по всій електроенергетичній системі (ЕЕС), але сконцентрованих в більшості в розподільних електричних мережах (РЕМ). В основному це електростанції, які використовують відновлювані джерела електричної енергії. Це сонячні (СЕС), вітрові (ВЕС) електростанції та малі гідроелектростанції, генерування яких є нестабільним оскільки залежить від природних умов. Вони постачають електроенергію найближчим споживачам, а в разі надлишків енергії можуть її передавати в мережі централізованого електропостачання. Отже, розподільні мережі енергопостачальних компаній мають забезпечувати перетікання електроенергії від розподільних підстанцій до споживачів, а також від розосереджених в них джерел електроенергії (РДЕ) через підстанції до ЕЕС.

Серед багатьох інших, до таких задач відноситься узгодження місць оптимального секціонування РЕМ, які експлуатуються як радіальні. Вве-дення в них електростанцій, які використовують ВДЕ, переводить частину ліній електропередачі в режим роботи з двостороннім живленням. Це змінює потокорозподіл в мережі, що може призвести до збільшення втрат електроенергії в ній, якщо не оптимізувати місця під’єднання РДЕ та їх потужність. Для зменшення втрат електроенергії під час її транспортування також необхідно коригувати потоки потужності, що відповідають місцям секціонування РЕМ, які раніше були вибрані тільки з умов забезпечення нормативів по надійності електропостачання. Тому оптимізація потоків потужності в ЛЕС з ВДЕ є актуальним завданням, покликаним забезпечити зменшення втрат електроенергії в електричних мережах, підтримувати балансну надійність і покращити якість електропостачання.

Водночас впровадження ВДЕ представниками різних форм власності покликано розвантажити РЕМ, підвищити їх ефективність, наприклад, наближуючи ВДЕ до споживачів та зменшуючи за рахунок цього втрати електричної енергії на транспортування. Підвищується надійність та покращується якість електропостачання, що підвищує соціальні стандарти населення, яке мешкає в районі ЛЕС.

З метою зменшення втрат електричної потужності під час транспортування електроенергії, генерованої СЕС, в дослідженнях розглядаються, як правило, розподільні електричні мережі 6÷10 кВ. Водночас, іноземні дослідники додатково розглядають і мережі 0,4 кВ, в яких СЕС, в першу чергу, задовольняють потреби в електроенергії їх власників і лише надлишок електроенергії передається від СЕС в РЕМ та часто споживається найближчими до СЕС споживачами. За таких умов декілька інверторів СЕС різних власників можуть бути приєднані до однієї РЕМ з ВДЕ в різних вузлах 0,4 кВ.

Дослідження умов виникнення, характеру розвитку та можливих наслідків анормальних режимів електричних мереж з екстремальними значеннями параметрів режимів, такими як перенапруги та надструми, традиційно виконують за допомогою математичних моделей з лінійними і симетричними елементами. Це пояснюється великим досвідом розробки та використання моделей даного класу на практиці, оскільки основою прийняття рішень під час проектування та експлуатації мереж є результати моделювання перш за все нормальних режимів. В той же час більш детальний аналіз показує, що наявність в сучасних електромережах джерел спотворень, головним чином, несиметрії та несинусоїдності, що суттєво впливає на поточні значення параметрів режиму, в тому числі і на ймовірність переходу цих значень через граничні межі.

Магістральні лінії електропередачі напругою 330–750 кВ є основними системоутворюючими лініями в Об’єднаній енергосистемі України та забезпечують видачу електричної енергії від потужних блоків атомних електростанцій, а також необхідний обмін між окремими енергосистемами. Крім того, їх розвиток та ефективна експлуатація – важлива передумова інтеграції Об’єднаної енергосистеми України в європейську енергосистему в майбутньому. Саме тому, пошкодження таких ліній чи обладнання, що забезпечує їх приєднання до енергосистеми, є важкою системною аварією, вона може викликати розпад об’єднаної системи на окремі частини, в яких буде існувати дефіцит чи надлишок генеруючих потужностей, і, відповідно, спричиняти відключення споживачів в дефіцитних регіонах та зупинки блоків електростанцій в надлишкових регіонах. Звісно, такий анормальний режим магістральної електричної мережі буде суттєво відрізнятись від оптимального. Отже, попередження виходу з ладу ліній електропередачі надвисокої напруги (ЛЕП НВН) – важлива наукова та практична задача з точки зору надійності електропостачання і забезпечення задовільних показників якості та ефективності функціонування магістральних електричних мереж (МЕМ).

Однією з основних причин виходу з ладу основного обладнання в магістральній електричній мережі є перенапруги, тобто підвищення величини робочої напруги вище максимально допустимого значення, відповідно до технічного регламенту. Це пояснюється тим, що передбачено порівняно малий резерв ізоляції для складових елементів магістральних електричних мереж через високу вартість для даного класу напруги.

Зі збільшенням робочих напруг потужних енергетичних систем вартість ізоляції стає суттєвим фактором капітальних витрат. Визначальними стають внутрішні перенапруги. Такі, перенапруги можуть виникнути, наприклад, при включенні ЛЕП НВН на автотрансформатор (АТ) в режимі холостого ходу; при відключенні фази лінії під час однофазного автоматичного повторного включення (ОАПВ) та ін.

**Метою наукової праці** є підвищення енергоефективності електроенергетичних систем, в яких експлуатуються вітрові та сонячні фотоелектричні електростанції, щоі приєднані на паралельну роботу у складі Об’єднаної енергетичної системи України.

Відповідно до вказаної мети в роботі розв’язуються такі основні завдання:

– застосування нових підходів щодо моделювання анормальних режимів ЛЕП НВН;

* розробка математичних моделей для дослідження резонансних процесів на ЛЕП НВН в несиметричних режимах;

– створення та навчання штучної нейронної мережі для аналізу анормальних несинусоїдних режимів з метою виявлення джерел перенапруг на вищих гармонічних складових;

– визначення зон небезпечних значень параметрів ЛЕП НВН, в яких можливе виникнення та розвиток анормальних перенапруг.

– аналіз особливостей експлуатації локальних електричних систем;

– дослідження пошкоджуваності обладнання локальних електричних систем та впливу СЕС на ці пошкодження;

– розроблення математичної моделі втрат активної потужності в локальній електричній системі з ГЕС та СЕС для дослідження впливу останніх на режим електричних мереж та умови, за яких втрати в них мінімальні;

– розроблення методу коригування потокорозподілу в ЛЕС з різнотипними РДЕ шляхом зміни потужності генерування ГЕС для зменшення втрат електроенергії;

– подальший розвиток методу визначення раціонального місця секціонування електричної мережі ЛЕС з врахуванням технічного стану електрообладнання;

– розроблення комп’ютерної моделі ЛЕС у програмному забезпеченні *PS CAD* з декількома СЕС для дослідження усталених та перехідних процесів в ЛЕС з інверторами, які працюють за ПІ законами керування;

– розроблення алгоритму визначення оптимальної потужності ГЕС в ЛЕС для коригування поточної точки потокорозділу в місце фактичного розташування комутаційного апарату секціонування ЛЕС;

– розроблення алгоритму визначення зони нечутливості втрат активної потужності в ЛЕП до поточної потужності ГЕС;

– вдосконалення автоматизованої системи керування (АСК) ВДЕ в ЛЕС з застосуванням *Smart Grid* технологій.

**Характеристика результатів наукової праці.**

В роботі проаналізовано можливості розвитку перенапруг в анормальних режимах магістральних електричних мереж з відновлюваними джерелами спотворень з джерелами, що характеризуються спотвореннями: несиметричними, несинусоїдними та комбінованими. Досліджені анормальні перенапруги в електропередачах надвисокої напруги, що виникають внаслідок протікання багатьох взаємопов'язаних між собою процесів, які залежать від значень великої кількості параметрів, насамперед від характеристик електричних станцій з відновлюваними джерелами енергії. Саме це зумовило необхідність удосконалення існуючих та розробки нових методів дослідження даного виду перенапруг в сучасних умовах експлуатації електроенергетичної системи. У роботі вирішено важливе для електроенергетики наукове завдання удосконалення методів, імітаційних і математичних моделей для аналізу анормальних перенапруг в магістральних електричних мережах з метою їх попередження та обмеження.

Розглянуто вплив анормальних режимів магістральних електричних мереж на режими роботи розподільчих електричних мереж з відновлюваними джерелами енергії. Розроблено метод оптимального керування потоками потужності в локальній електричній системі з різнотипними відновлюваними джерелами. Вплив на перерозподіл потоків потужності здійснюється зміною генерування потужності малих ГЕС. Для зменшення втрат електроенергії під час її транспортування виконано коригування потоків потужності, що відповідають місцям секціонування розподільчих електричних мереж, які раніше були вибрані тільки з умов забезпечення нормативів по надійності електропостачання. Отримано нове вирішення актуальної науково-прикладної задачі оптимізації функціонування електричних систем з оцінюванням впливу анормальних режимів, що полягає в узгодженому керуванні генеруванням сонячних електростанцій та малих гідроелектростанцій для оптимізації потоків потужності і зменшення втрат електроенергії в умовах виникнення анормальних перенапруг.

Вирішено проблему створення сприятливих умов для підвищення якості регулювання частоти електроенергетичної системи з відновлюваними джерелами енергії з оцінюванням впливу несиметричних та несинусоїдних джерел спотворення на основі розвитку методів ідентифікації динамічної моделі електроенергетичної системи з використанням даних системи моніторингу перехідних режимів. Розроблено нові методи залучення відновлюваних джерел енергії з регуляторами віртуальної інерції до регулювання частоти електроенергетичної системи. Встановлено, що значна частка відновлюваних джерел енергії з інверторним приєднанням в енергобалансі призводить до погіршення умов функціонування систем автоматичного регулювання частоти, що пов’язано зі зменшенням еквівалентної постійної інерції енергосистеми. Досліджено методи автоматичного регулювання потужності відновлюваних джерел енергії в перехідних режимах електроенергетичної системи.

**Наукова новизна** одержаних результатів полягає у такому:

– удосконалено методи та математичні моделі для дослідження АП, які, на відміну від традиційних, дозволяють враховувати поперечну та повздовжню несиметрії ЛЕП НВН і умови комутації груп автотрансформаторів на електричних підстанціях, що підвищує адекватність моделювання процесів та обґрунтованість рекомендованих заходів із унеможливлення виникнення АП.

- розроблено нову математичну модель несинусоїдних режимів ліній електропередач надвисокої напруги, використання якої в ШНМ забезпечує ефективну обробку великих обсягів інформації в магістральних електричних мережах реального об'єму.

- удосконалено математичну модель електропередачі для дослідження анормальних перенапруг в безструмовій паузі однофазного автоматичного повторного включення, в якій поєднані аналітичні та імітаційні підходи, що, на відміну від спрощених аналітичних методів, дозволяє отримувати якісно нові результати досліджень і гарантовано знаходити всі можливі області існування параметрів режиму магістральних електричних мереж, в яких відбувається небезпечне анормальне підвищення напруги.

- вперше отримана аналітична залежність між довжиною реально транспонованої ЛЕП та значеннями параметрів елементів її заступної схеми, що дозволяє виконувати експрес-оцінку наявності необхідних умов виникнення АП при вирішенні проектних та експлуатаційних задач в магістральних електричних мережах.

- вперше розроблено метод коригування потоків потужності в локальній електричній системі з різнотипними відновлюваними джерелами електрое-нергії шляхом оптимального керування потужністю генерування малих гідроелектростанцій, що дозволяє визначити умови для наближення потокорозподілу в секціонованій електричній мережі до оптимального за втратами електроенергії в ній;

– отримав подальший розвиток метод визначення раціонального місця секціонування розподільних електричних мереж, який дозволяє оцінити і врахувати неможливість транспортування електроенергії розосереджених джерел генерування в разі пошкоджень в електричній мережі та дозволяє визначити техніко-економічний ефект від встановлення додаткових комутаційних апаратів секціонування мережі.

**Практична значимість** Практична цінність роботи полягає, зокрема, в тому, що з використанням запропонованої математичної моделі реально транспонованої лінії можна більш точно визначити значення параметрів, за яких виконуються умови виникнення анормальних перенапруг при несиметричних режимах. А розроблена штучна нейронна мережа дає можливість встановити на практиці, при яких факторах виникають перенапруги на вищих гармонічних складових з небезпечними для ізоляції обладнання характеристиками.

За результатами досліджень розроблено рекомендації щодо впровадження практичних заходів для попередження виникнення анормальних перенапруг ліній електропередач. Для несиметричного режиму – це перевід групи шунтувальних реакторів (ШР) в неповнореакторний режим шляхом відключення ШР в однойменній фазі, стосовно перенапруг на вищих гармонічних складових – використання для комутацій керованого елегазового вимикача, що працює в визначеному за допомогою ШНМ діапазоні кутів вмикання.

Результати досліджень анормальних перенапруг за допомогою розроблених методів та моделей були передані в інститут "Енергомережпроект" та Національну енергетичну компанію (НЕК) "Укренерго" і використано при побудові та введенні в експлуатацію підстанції "Київська-750".

Практична цінність роботи полягає в тому, що розроблено алгоритми і програми коригування потоків потужності в секціонованій за умов надійності розподільній електричній мережі шляхом зміни генерування потужності керованих РДЕ, в першу чергу малих гідроелектростанцій і, в перспективі, сонячних електростанцій. Відповідним чином вдосконалено структурну схему автоматизованої системи керування станціями, які використовують ВДЕ, що дозволяє узгоджувати графіки видачі потужності та її споживання.

На основі отриманих у роботі результатів – умов оптимальності, методів та алгоритмів, вдосконалено комплекс програм інтелектуальної підтримки роботи диспетчера розподільних електричних мереж, який передано для дослідної експлуатації до ПАТ «Вінницяобленерго».

**Інша інформація, яка характеризує роботу.** Загальна кількість публікацій авторів – 62, з них за тематикою роботи – 57 публікацій, серед, яких патент на корисну модель, 2 монографії. Загальна кількість посилань на членів авторського колективу наукової праці у пошуковій системі [*http://scholar.google.com/*](http://scholar.google.com/) складає 20, h-індекс 3.

В результаті виконання наукової праці захищено 3 кандидатські дисертації.

Отримані результати пройшли апробацію та обговорювалися на 25 міжнародних науково-технічних конференціях в Україні та за її межами.

**Порівняння з кращими вітчизняними та зарубіжними аналогами.**

За даною тематикою ведеться активна робота закордонних та вітчизняних вчених, що включає на різні аспекти функціонування ВДЕ у розподільних мережах. Дослідження та аналіз сторонніх науково-технічних розробок показали, що для зменшення втрат електроенергії та покращення показників її якості доцільно переходити до розв’язання комплексної задачі оптимізації схеми РЕМ. Це передбачає реалізацію ефективних проектних рішень та впровадження систем оперативної реконфігурації схем приєднання ВДЕ засобами Smart Grid, зокрема у роботі M. P Ananda, W. Ongsakula, Jai Govinda Singh, S. Golshannavaza «Economic operational Scheduling of a smart distribution network considering demand response, electric vehicles and network reconfiguration». Наприклад, у статті авторів J. Junga, A Onena, R. Arghandeha, R. Broadwatera “Coordinated control of automated devices and photovoltaic generators for voltage rise mitigation in power distribution circuits” обґрунтовують необхідність координованого керування автоматизованими пристроями і фотоелектричними генераторами для зменшення негативного впливу наслідків підвищення напруги в колах РЕМ джерелами ВДЕ. Для цього запропоновано алгоритм по зменшенню втрат потужності та стабілізації напруги шляхом використання регуляторів напруги та пристроїв компенсації реактивної потужності в мікромережі. У роботі авторів Hua Han, Xiaochao Hou, Jian Yang, Jifa Wu «Review of Power Sharing Control Strategies for Islanding Operation of AC Microgrids» досліджуються питання автономної роботи РЕМ у напрямах симетричного розподілу навантаження між паралельно працюючими інверторами та дотримання вимог якості електроенергії. У статті авторів Li Shengqi, Zeng Lili, Li Yongan «Optimal Reactive Power Planning of Radial Distribution Systems with Distributed Generation» висвітлено питання оптимізації впливу частки ВДЕ у балансі реактивної потужності РЕМ вітро- та сонячними електростанціями. У книзі О.В. Кириленка «Інтелектуальні електричні мережі: елементи та режими» приділено увагу щодо створення інтелектуальних електричних мереж на базі концепції SMART GRID з урахуванням особливостей енергоринку та ВДЕ. В статті авторів Кириленко. О.В., Павловського В.В., Лукяненко Л.М., Трач І.В. «Проблеми інтеграції відновлюваних джерел електроенергії в «слабкі» електричні мережі» показано, що конфігурація мережі залежить від вибору режимів окремих генераторів, що дає змогу зменшити втрати електроенергії в системі. Неузгодженість режимів роботи може призвести до надлишкових втрат. В статті «Інтеграція поновлюваних джерел енергії в розподільні електричні мережі сільських регіонів» авторів Тугая Ю.І., Козирського В.В., Гая О.В., Бодунова В.М. йдеться про те, що інтеграція ВДЕ в розподільні електричні мережі сільських регіонів може суттєво покращити надійність електропостачання.

Для дослідження можливості виникнення анормальних перенапруг відомі роботи Кузнецова В.Г., Шполянського О.Г. та Тугая Ю.І. по визначенню характеристик перенапруг аналітичними методами розрахунку електричних кіл. Але більш точним і адекватним є використання математичного моделювання, що наведені в роботах Бржицього В.О., Яновського В.Я., Крисюка О.В. В той же час в роботах Сегеди М.С. та Равлика О.М. наведені результати використання тільки імітаційного моделювання, основаного на математичних моделях, не дає можливості повною мірою відтворити ймовірнісну природу перенапруг .

Таким чином, тематика наукової роботи актуальна та активно досліджується у закордонних та вітчизняних наукових роботах.

**Впровадження результатів наукової праці.** Розроблені моделі та методи були використані для підготовки і впровадження в експлуатацію рекомендацій по уникненню анормальним режимам в електропередачах 750 кВ магістральної електричної мережі НЕК "Укренерго", зокрема: порядок підключення ненавантаженого автотрансформатора на Рівненській АЕС; заходи для створення неповнореакторного режиму на лінії підстанція Київська-750 – Хмельницька АЕС. Також подані висновки аналізу перенапруг на парних гармоніках в електропередачі Хмельницька АЕС – Жешув (Польща), яку планується ввести в експлуатацію в процесі інтеграції ОЕС України в енергосистеми UCTE.

Працездатність та ефективність запропонованих у роботі методів і ал-горитмів підтверджена обчислювальними експериментами з оптимізації та керування режимами ЛЕС з відновлюваними джерелами електроенергії. На основі отриманих у роботі умов оптимальності, методів та алгоритмів вдосконалено комплекс програм інтелектуальної підтримки роботи диспетчера ЛЕС, який передано для дослідної експлуатації до ПАТ «Вінницяобленерго» (акт впровадження від 28.10.2016 р.). Результати роботи впроваджено також у навчальний процес національного технічного університету України «КПІ ім. І. Сікорського» (10.02.2016 р.), Вінницького національного технічного університету (акт впровадження від 1.11.2016 р.).

**Обсяги впровадження наукової праці.** Результати наукової праці впроваджено на ПЗЕС, підпорядкованого Міністерству палива та енергетики України.

Розроблені теоретичні положення та практичні результати знайшли застосування у навчальному процесі Вінницького національного технічного університету.

В роботі представлено результати досліджень, які проводилися у відділі оптимізації систем електропостачання Інституту електродинаміки Національної академії наук України при виконанні таких планових науково-дослідних робіт: «Розробити методи та моделі аналізу статичних і динамічних режимів систем електропостачання під дією неврівноважених, несинусоїдальних і асиметричних збурень» (постанова Бюро ВФТПЕ НАН України від 13.10.2008 р, № III-24-09 «Безпека-2», 2009-2013 рр., № ДР 0108U010415); «Розвиток наукових основ створення засобів моніторингу, діагностики та керування електроенергетичними системами та об’єктами» (постанова Бюро ВФТПЕ НАН України від 26.12.2006 р., № ІІ-13-07 «Діамант-2», 2007-2011 рр., № ДР 0107U002701); «Дослідження внутрішніх перенапруг в магістральних електричних мережах надвисокої напруги та розробка і впровадження заходів по їх запобіганню і обмеженню» (розпорядження Президії НАН України № 358 від 18.06.2010 та №456 від 28.07.2010, шифр «Об`єднання», 2010-2012 рр., № ДР 0110U003766); «Розвиток наукових основ та розроблення інтелектуальної електричної мережі об’єднаної енергосистеми» (постанова Бюро ВФТПЕ НАН України від 08.11.2011р., № III-39-12 «Інтелмер», 2012-2016 рр., № ДР 0112U002291).

– при виконанні яких здобувач був і є виконавцем основних розділів. Ці розділи, зокрема, присвячені проблемам виявлення та дослідження перенапруг при анормальних режимах, що викликані як зовнішніми джерелами спотворень режиму, так і відхиленнями параметрів елементів електричних мереж від номінальних значень. Також робота виконана в плані наукових досліджень, проваджених кафедрою електричних станцій та систем ВНТУ за держбюджетними темами: «Оптимізація функціонування електричних мереж енергосистем в умовах зростання навантаження споживачів та децентралізації їх живлення» (№ держреєстрації 0110U002161) та «Інтелектуалізація електроенергетичних систем з відновлювальними джерелами енергії на основі принципу Гамільтона-Остроградського» (№ держреєстрації 0113U003138), «Інтегрування нетрадиційних та відновлюваних джерел енергії в електричні мережі для підвищення їх енергоефективності з використанням SMART GRID технологій» (Наказ Міністерства освіти і науки України №63 від 24 січня 2018 р., 2018-2020 рр.) – при виконанні яких здобувачі були і є виконавцями.

**Економічна ефективність**

Отже, наукова праця «Заходи та засоби підвищення надійності та якості електропостачання, а також зменшення втрат електроенергії в електроенергетичних системах з відновлюваними джерелами енергії», в якій вирішено важливу науково-прикладну задачу розробки теоретичних засад та впровадження на практиці математичних моделей та методів формування умов оптимальності взаємовпливу електроенергетичних систем засобами автоматичного керування. Запропоновані в роботі методи та заходи направлені на покращення функціонування вітрових та сонячних електростанцій у складі ОЕС України в сучасних умовах відповідно до законодавства України та Енергетичного Співтовариства.

Проведені розробки мають значне економічне значення для електроенергетики України, оскільки впровадження розроблених підходів дає відчутний економічний ефект.