

Міністерство освіти і науки України  
Національний університет "Львівська політехніка"

**КОМАР ВЯЧЕСЛАВ ОЛЕКСАНДРОВИЧ**

УДК [621.316.1:621.311.29]:006.015.5(043.5)

**ОЦІНЮВАННЯ ЯКОСТІ ФУНКЦІОНУВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ З  
ВІДНОВЛЮВАНИМИ ДЖЕРЕЛАМИ ЕНЕРГІЇ**

05.14.02 – електричні станції, мережі і системи

**Автореферат**  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
доктора технічних наук

Львів–2019

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Вінницькому національному технічному університеті Міністерства освіти і науки України.

**Науковий консультант:** доктор технічних наук, професор  
**Лежнюк Петро Дем'янович,**  
завідувач кафедри електричних станцій і систем  
Вінницького національного технічного університету

**Офіційні опоненти:** доктор технічних наук, професор  
**Варецький Юрій Омелянович,**  
професор кафедри електроенергетики та систем  
управління, Національний університет «Львівська  
політехніка»

доктор технічних наук, старший науковий співробітник  
**Кузнєцов Микола Петрович,**  
заступник директора з наукової роботи Інституту  
відновлюваної енергетики НАН України

доктор технічних наук, професор  
**Попов Володимир Андрійович,**  
завідувач кафедри електропостачання Національного  
технічного університету України «Київський  
політехнічний інститут» ім. І. Сікорського

Захист відбудеться “ 17 ” 05 2019 р. о 14 годині 00 хвилин на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 35.052.02 у Національному університеті "Львівська політехніка" (79013, Львів–13, вул. С. Бандери, 12, ауд. 226 головного корпусу).

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Національного університету "Львівська політехніка" (Львів, вул. Професорська, 1).

Автореферат розісланий “ 09 ” 04 2019 р.

*Учений секретар спеціалізованої  
вченої ради Д 35.052.02*

*В.І. Коруд*

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Дисертація присвячена вирішенню науково-прикладної проблеми розроблення методів і засобів для оцінювання якості функціонування електричних мереж з відновлюваними джерелами енергії для розбудови їх з більшою енергоефективністю.

**Актуальність теми.** На сучасному етапі розвитку електроенергетики наряду з питаннями вдосконалення технологій все більшої актуальності набувають питання раціональної організації експлуатації, управління функціонуванням і розвитком електричних мереж енергосистем. Зумовлені вони рівнем електрифікації промисловості і побуту, що вимагає від електроенергетичної галузі підвищених вимог до якості електропостачання. Законом України «Про ринок електричної енергії» у статті 18 визначено термін «якість електропостачання» як характеристику рівня надійності електропостачання, комерційної якості надання послуг з передачі, розподілу та постачання електричної енергії, а також якості електричної енергії.

Перелік показників, які характеризують якість електропостачання, визначений в нормативних документах та постановах НКРЕКП. Виділити з такої множини показників визначальні складно і залежать вони від особливостей споживачів. Тобто, оцінити рівень якості електропостачання можна лише за результатом по системі в цілому. Розв'язання цієї задачі відносно сучасних електроенергетичних систем можливе лише на основі системного аналізу. Вимоги забезпечення якості електропостачання в значній мірі визначають принципи побудови та експлуатації електричних мереж, а також склад і особливості генерувальних потужностей. Тобто, необхідно досліджувати якість функціонування системи, яка має забезпечити необхідний рівень якості електропостачання.

Поняття якості функціонування технічних систем визначено в роботах І. А. Ушакова та Г. В. Дружиніна і стосується систем, для яких не можна сформулювати критерій відмови у формі «все або нічого». До таких систем відноситься і електроенергетична система (ЕЕС). Внаслідок її надлишковості відмова деяких (або навіть багатьох) елементів призводить лише до часткового зниження функціональних можливостей системи. Показник якості функціонування характеризує здатність системи виконувати свої основні функції з пониженим рівнем продуктивності, ефективності тощо. Якість функціонування електроенергетичної системи можна оцінити за декількома критеріями. Основними з них є: якість електричної енергії, надійність електропостачання, його економічність, стійкість і живучість електроенергетичних систем, зменшення негативного впливу на оточуюче середовище.

Проблемі визначення складових якості функціонування технічних систем, зокрема електроенергетичних, присвячено значну кількість публікацій відомих наукових шкіл, зокрема Б. С. Стогнія, І. В. Жежеленка, В. Г. Холмського, А. В. Кириленка, А. К. Шидловського, В. Г. Кузнецова, Ю. С. Железка, П. Д. Лежнюка, Ю. О. Варецького, М. І. Воропая.

В умовах інтенсивної розбудови відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) електричні мережі (ЕМ) набувають ознак локальної електричної системи (ЛЕС). Процес її функціонування може бути представлений як послідовна зміна станів. Кожен з станів характеризується певним рівнем готовності ЛЕС до забезпечення якісного електропостачання. Оцінювання стану конкретних ЛЕС і порівняння їх функціональної готовності є актуальним під час аналізу якості функціонування і прийняття рішень з розвитку електричних мереж в умовах розбудови відновлюваних джерел енергії. Існуюча методологія оцінювання якості функціонування побудована на аналізі множини показників, які характеризують окремі сторони функціонування ЛЕС. Це викликає складності під час трактування отриманих результатів в наслідок багатовекторності цієї задачі.

Пошук шляхів розв'язання протиріч, які виникають під час оцінювання якості функціонування ЛЕС, і складає науково-практичну проблему цього дослідження: необхідність створення єдиних теоретико-методологічних основ оцінювання, забезпечення і підтримання якості функціонування ЛЕС шляхом розроблення оптимальних стратегій розвитку електричних мереж в умовах розбудови відновлюваних джерел енергії. Подолати зазначені протиріччя можна шляхом зведення векторної задачі до скалярної. Це можна досягнути шляхом підвищення ступеня формалізації оцінювання якості функціонування.

Тому, актуальним є розроблення методів і математичних моделей для визначення інтегрального показника якості функціонування електричних мереж з відновлюваними джерелами енергії.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертація виконана в плані наукових досліджень кафедри електричних станцій та систем Вінницького національного технічного університету за держбюджетними темами «Оптимізація функціонування електричних мереж енергосистем в умовах зростання навантаження споживачів та децентралізації їх живлення» (№ держреєстрації 0110U002161), «Методи та засоби оптимізації сумісної роботи локальних електричних систем з відновлюваними джерелами енергії та систем централізованого електропостачання» (№ держреєстрації 0113U003138), «Методи аналізу та оптимізації режимів електричних мереж з об'єктами розподіленого генерування і неконвенційними навантаженнями» (№ держреєстрації 0113U003198), «Оптимізація режимів електричних мереж з розподіленими джерелами енергії» (№ держреєстрації 0113U002260С), «Інтелектуалізація електроенергетичних систем з відновлюваними джерелами енергії на основі принципу Гамільтона-Остроградського» (№ держреєстрації 0115U002382). Автор брав участь у виконанні вищевказаних робіт як виконавець. За держбюджетною темою «Інтегрування нетрадиційних та відновлюваних джерел енергії в електричні мережі для підвищення їх енергоефективності з використанням SMART GRID технологій» (№ держреєстрації 018U000206) та госпдоговірними темами «Програмно-апаратний комплекс прогнозування режимів функціонування фотовольтаїчних електричних

станцій» (№ договору 2162), також «Розроблення системи прогнозування виробітку електричної енергії фотоелектричними станціями» (№ договору 2163) автор брав участь у виконанні вищевказаних робіт як відповідальний виконавець.

**Мета та завдання дослідження.** Метою дослідження є створення теорії та методів оцінювання якості функціонування електричних мереж з відновлюваними джерелами енергії для підвищення ефективності проектних та експлуатаційних рішень, що створює умови для вибору стратегії розбудови мереж на основі системного аналізу процесів в них.

Для досягнення поставленої мети в роботі розв'язано такі основні задачі:

- розробити математичну модель інтегрального показника якості функціонування електричних мереж як узагальненої характеристики в задачах їх проектування та оптимальної експлуатації;
- розробити засади оцінювання базового стану електричної мережі для отримання загальної методології оцінювання складових інтегрального показника якості функціонування;
- розробити методи визначення складових інтегрального показника якості функціонування електричних мереж з відновлюваними джерелами енергії;
- розвинути методи прийняття оптимальних рішень в задачах проектування електричних мереж та їх експлуатації з використанням інтегрального показника якості їх функціонування;
- розробити метод визначення оптимальних рівнів розбудови відновлюваних джерел енергії з метою підвищення якості функціонування в електричних мережах;
- дослідити можливості відновлюваних джерел енергії для забезпечення регулювання реактивної потужності та напруги в електричній мережі;
- розробити систему моніторингу та керування електричними мережами з відновлюваними джерелами енергії для інформаційного забезпечення задачі оцінювання якості функціонування;
- розробити алгоритми та їх програмну реалізацію для оцінювання складових інтегрального показника якості функціонування та узгодження графіків генерування і споживання в локальних електричних системах;
- дослідити можливість використання накопичувачів енергії з метою підвищення якості функціонування електричних мереж в умовах поступового зростання потужності ВДЕ.

**Об'єктом досліджень** дисертаційної роботи є нормальні режими електричних мереж з відновлюваними джерелами електроенергії.

**Предметом досліджень** є методи і засоби оцінювання та аналізу якості функціонування електричних мереж з відновлюваними джерелами електроенергії.

**Методи досліджень.** Для аналізу та розв'язання поставлених задач використано узагальнюючі методи теорії подібності й моделювання, теорію марковських та напівмарковських процесів, методи статистичного аналізу на основі Гауссових сумішей, методи лінійного й нелінійного програмування. Усталені режими ЕМ моделювалися на базі методу вузлових напруг. Для опису математичних моделей та формування обчислювальних алгоритмів використано матричну алгебру, теорію графів, декомпозицію та об'єктно-орієнтований аналіз.

**Наукова новизна одержаних результатів:** полягає в тому, що проведений комплекс досліджень дозволяє здійснити теоретичне узагальнення і розв'язати науко-технічну проблему, яка полягає у розробленні методів і засобів для оцінювання якості функціонування електричних мереж з відновлюваними джерелами енергії для розбудови їх з більшою енергоефективністю та інвестиційною привабливістю.

*Зокрема вперше:*

- розроблено теоретичні основи і принципи оцінювання якості функціонування електричних мереж з відновлюваними джерелами енергії, що дозволило отримати інтегральний показник якості функціонування для оцінювання готовності мереж забезпечувати необхідний рівень енергоефективності електропостачання;

- запропоновано підхід для математичного опису функціонування електричних мереж з відновлюваними джерелами енергії за рахунок поєднання теорії подібності та теорії марковських процесів, що дозволило отримати інтегральний показник якості функціонування електричних мереж;

- розроблено методи оцінювання складових інтегрального показника якості функціонування електричних мереж, які ґрунтуються на застосуванні принципу найменшої дії і дозволяють визначати відхилення показників від оптимального їх значення, завдяки чому можуть порівнюватись електричні мережі з відновлюваними джерелами енергії різних конфігурацій та особливостей об'єктів генерування і споживання;

- обґрунтовано принципи розпізнавання конкурентоспроможних стратегій розвитку електричних мереж, що ґрунтуються на використанні інтегрального показника якості функціонування. Використання цих принципів створює основу для побудови методів пошуку оптимальних стратегій розвитку електричних мереж, придатних для розв'язання практичних задач.

*Набули подальшого розвитку:*

- метод визначення оптимальних встановленої потужності та точки приєднання відновлюваних джерел енергії з використання інтегрального показника якості функціонування електричної мережі та аналізу його чутливості до зміни параметрів електричних мереж, що, на відміну від існуючих, дозволяє забезпечити покращання функціонування електричних мереж за рядом показників;

- метод визначення потужності резерву в електроенергетичній системі шляхом узгодження графіків електричних навантажень і генерування відновлюваних джерел

енергії в ній за умови забезпечення заданого рівня якості електропостачання;

– метод визначення оптимальної стратегії розвитку електричної мережі, який ґрунтується на побудові динамічної моделі та враховує часові і просторові зв'язки. Використання розроблених принципів розпізнавання конкурентоспроможних стратегій розвитку електричних мереж з відновлюваними джерелами енергії, що дозволяє зменшити кількість станів, які розглядаються під час формування оптимальної стратегії їх розвитку.

**Практичне значення одержаних результатів.** Практична цінність роботи полягає в тому, що на підставі виконаних досліджень вирішено актуальну задачу підвищення якості функціонування електричних мереж з відновлюваними джерелами, що проявляється у розробленні засобів вибору оптимальних стратегій їх розвитку, алгоритмів та програмної реалізації методів вибору оптимальних потужностей ВДЕ з точки зору балансової надійності. Зокрема:

– розроблено методичне забезпечення для аналізу впливу відновлюваних джерел енергії на якість функціонування електричних мереж, що дозволяє розв'язати вказану задачу в умовах обмеженості і невизначеності інформації;

– розроблено алгоритми узгодження електроспоживання та генерування в локальній електричній системі, які реалізовано в програмних продуктах для визначення складових інтегрального показника якості функціонування і передані для дослідної експлуатації в електропостачальній компанії для прийняття рішень під час стратегічного планування;

– створено методи і алгоритми визначення оптимальної стратегії розвитку електричних мереж в умовах розбудови розосередженого генерування з різними характеристиками, а також електричних схем мереж для аналізу і обґрунтування технічних умов на приєднання джерел генерування;

– запропонована методика кількісного оцінювання інтегрального показника якості функціонування електричних мереж з відновлюваними джерелами енергії, яка реалізована в програмному продукті, призначеному для розв'язання задач аналізу і синтезу локальних електричних систем, зокрема доцільності об'єму інвестицій.

На розроблені програмні засоби отримано документи щодо захисту авторських прав на твір.

Працездатність та ефективність запропонованих у роботі методів і алгоритмів підтверджено обчислювальними експериментами для реальних електричних мереж. Розроблено програмні засоби для розрахунку ємності накопичувача енергії фотоелектричної станції (ФЕС), який передано для дослідної експлуатації до ТОВ «Подільський енергоконсалтинг» (довідка про впровадження від 07.04.2018 р.). Метод визначення потужності генерування ФЕС з урахуванням технічних втрат електроенергії та параметрів її якості впроваджено в ТОВ «Енергоінвест» (довідка про впровадження від 15.03.2018р). Методика оцінювання якості функціонування розподільних електричних мереж з відновлюваними джерелами енергії передані для

дослідного використання на підприємствах ПАТ «Вінницяобленерго» (довідка про впровадження від 03.05.2018 р.). Їх впровадження дозволило підвищити якість функціонування електричних мереж, зокрема знизити втрати електричної енергії на 0,6%, підвищити обсяги вироблення електроенергії і, відповідно, збільшити прибуток від експлуатації ряду ВДЕ на 2–5% за рахунок більш ефективного їх використання.

Результати дисертаційної роботи використано в навчальному процесі Вінницького національного технічного університету під час проведення лекційних та лабораторних занять (довідка про впровадження від 18.03.2018 р.).

**Особистий внесок здобувача.** Наукові положення, які містяться у дисертації одержані автором самостійно. У публікаціях, що видані у співавторстві, автору належить: у [1, 2, 4, 7, 18, 39] – отримано математичну модель критерію якості функціонування, яка ґрунтується на подібності систем рівнянь Колмогорова та нормування і ортогональності критеріального методу; [3] – вдосконалено метод розрахунку несинусоїдних режимів електричних мереж; [5, 6, 8] – метод використання критеріальної моделі для оцінювання якості функціонування розподільних електричних мереж; [9, 12] – алгоритм застосування інтегрального показника якості функціонування для оцінювання місць секціонування розподільних електричних мереж; [10, 44] – алгоритм визначення узагальненого техніко-економічного показника за результатами оцінювання якості функціонування електричної мережі; [11, 42] – алгоритм вибору етапів реконструкції розподільних електричних мереж за інтегральним показником якості функціонування; [13] – аналіз чутливості інтегрального показника якості функціонування до параметрів режиму електричної мережі; [14, 16] – метод оцінювання впливу розосередженого генерування на функціональну готовність розподільних електричної мережі; [15, 33] – виконано аналіз зміни якості функціонування електричних мереж від потужності відновлюваних джерел енергії і місця їх встановлення; [17, 21, 22, 23] – запропоновано метод оцінювання нестабільності відновлюваних джерел енергії; [19, 27, 40] – метод визначення оптимальної встановленої потужності фотоелектричної станції на основі аналізу нестабільності джерела енергії; [20] – виконано аналіз методів кваліметрії для оцінювання якості функціонування розподільних мереж з відновлюваними джерелами енергії; [24, 26, 28, 47] – метод узгодження графіків генерування і споживання; [25] – алгоритм визначення ємності накопичувача для забезпечення необхідного рівня балансової надійності локальної електричної системи; [29] – алгоритм визначення критеріїв подібності в задач оптимізації режимів електроенергетичних систем; [30, 32] – метод та алгоритм оцінювання інтегрального показника якості функціонування електричних мереж з відновлюваними джерелами енергії; [31] – умови оптимальності в задачі розроблення стратегії розвитку електричної мережі для забезпечення заданого рівня її якості функціонування; [34] – метод врахування імовірнісного характеру генерування сонячними електростанціями; [35] – метод визначення впливу



відновлюваних джерел енергії на балансову надійність локальних електричних систем; [36] – аналіз результатів моделювання з застосування фотоелектричних станцій для регулювання перетоків реактивної потужності; [37] – аналіз можливості застосування фотоелектричних станцій для підвищення якості функціонування електричних мереж; [38] – показана геометрична інтерпретація показника якості функціонування електричної мережі; [41, 46] – аналіз впливу роботи відновлюваних джерел енергії на режими електричних мереж; [43] – метод визначення показника нестабільності відновлюваних джерел енергії в задачі оцінювання балансової надійності локальної електричної системи; [45] – алгоритм аналізу чутливості режимних параметрів до під'єднаної потужності джерел енергії; [48] – алгоритми визначення «ідеального» режиму електричної мережі з розосередженим генеруванням.

Результати досліджень, що викладені у [1 – 48], були отримані у Вінницькому національному технічному університеті.

**Апробація результатів дисертації.** Основні положення роботи та її результати доповідались, обговорювались та були схвалені на таких міжнародних науково-технічних конференціях та семінарах: «Проблеми і перспективи розвитку енергозбереження комунального господарства і промислових підприємств» (м. Луцьк, 2012–2018 р.р.); «Энергетика: управление, качество и эффективность использования энергоресурсов», (м. Благовіщенськ 2013 р.); «Оптимальне керування енергоустановками (ОКЕУ)», (м. Вінниця 2013, 2015, 2017 р.р.); «Електричні мережі енергосистем з нетрадиційними і відновлюваними джерелами електроенергії» в плані семінарів Наукової ради з проблеми «Наукові основи електроенергетики» НАН України, (м. Вінниця 2014–2018 р.р.); «Відновлювальна енергетика та енергоефективність у XXI столітті» (м. Київ, 2014–2018 р.р.); «Контроль і управління в складних системах (м. Вінниця, 2014, 2016, 2018 р.р.); «Розподільчі мережі 0,4-35 кВ як складова частина локальних електроенергетичних систем майбутнього» (м. Хмельницький, 2016 р.); «Сучасні методи аналізу усталених режимів електричних мереж та стійкості електроенергетичних систем. Новітні досягнення у проведенні тренажерної підготовки оперативно-диспетчерського персоналу» (с.м.т. Славськ, 2017 р.); «Інтелектуальні енергетичні системи – ESS'17» (м. Київ, 2017 р.); IEEE First Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON); «Проблеми сучасної електротехніки – 2018» (м. Київ, 2018 р.).

**Публікації.** Матеріали дисертаційної роботи опубліковані у 44 друкованих наукових працях, з них 2 монографії, 24 статті у наукових фахових виданнях України й 10 статей у періодичних виданнях іноземних держав, серед яких 6 статей у виданнях, що входять до міжнародних наукометричних баз Scopus, Web of Science та Index Copernicus, 2 у наукових періодичних виданнях України, 6 публікацій у збірниках матеріалів та тез наукових конференцій. Крім того, отримано 1 патент на

корисну модель, 3 свідоцтва про реєстрацію авторського права на програмні продукти, які розроблені за результатами досліджень.

**Структура й обсяг дисертації.** Дисертаційна робота складається з вступу, шести розділів, висновків, списку використаних джерел (200 найменувань) і семи додатків. Основний зміст викладений на 304 сторінках друкованого тексту, містить 149 рисунків, 23 таблиці. Загальний обсяг дисертації – 337 сторінок.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертації, сформульовані мета та задачі дослідження. Вказана наукова новизна та практична цінність отриманих результатів. Наведені відомості щодо апробації роботи, особистий внесок здобувача і публікації. Зазначено зв'язок роботи з науковими програмами та темами.

У **першому** розділі виконано аналіз проблем забезпечення якісного електропостачання в умовах інтенсивної розбудови відновлюваних джерел енергії (ВДЕ). Досліджено процес електропостачання засобами кваліметрії і визначено характеристики електричних мереж, які є істотними для забезпечення якісного електропостачання. Запропоновано підхід оцінювання якості функціонування мереж як інтегральної характеристики готовності електричної мережі з ВДЕ, що сприятиме покращанню якості електропостачання.

Відповідно до Закону України про ринок електричної енергії вводиться поняття «якість електропостачання». Якість електропостачання характеризується рівнем надійності (безперервності) електропостачання, економічністю надання послуг з передачі, розподілу та постачання електричної енергії, а також якістю електричної енергії.

На сьогодні розподільні електричні мережі практично вичерпали резерв пропускної спроможності, мають низький рівень автоматизації, дистанційне керування обмежене застосуванням застарілого обладнання. Мережі, як правило, розгалужені і мають значну протяжність від 15 до 25 км, іноді до 50 км, секціонування їх практично всюди забезпечується лінійними роз'єднувачами, а оснащення сучасними реклоузерами тільки розпочинається. Ця ситуація ускладнюється невпорядкованою розбудовою ВДЕ, що часто негативно впливає на якість електропостачання.

В цих умовах, під час планування розвитку ВДЕ в електричних мережах, слід розглядати два варіанти. Перший – розбудова ВДЕ без суттєвих змін в схемі електричної мережі та без оновлення її електрообладнання, інший – розвиток генерування в електричній мережі з одночасною її реконструкцією і модернізацією. Враховуючи нинішній технічний стан обладнання мереж, доцільнішим є другий варіант. Розвиваючись за цим варіантом, одночасно з покращанням технічного стану електричної мережі можна збільшувати установлену потужність ВДЕ до значень, які відповідають сонячному потенціалу, гідро- та вітроресурсу регіону. Тоді як за першим варіантом допустиму установлену потужність ВДЕ суттєво обмежує пропускна здатність елементів електричної мережі. Для прийняття рішення щодо вибору варіанта розвитку необхідно оцінити поточний стан функціональної готовності електричних мереж щодо забезпечення якісного електропостачання.

Для оцінювання рівня якості функціонування електричних мереж з

відновлюваними джерелами енергії в роботі зроблено спробу використати класичні підходи кваліметрії. Для цього використано метод розгортання функції якості (Quality Function Deployment). Цей метод об'єднує в собі декілька підходів і дозволяє зробити перехід від побажань потенційних споживачів мати якісний продукт до проектування технологічного процесу отримання цього продукту.

Застосування математичного апарату кваліметрії дозволило визначити множину параметрів, вплив на які може забезпечити необхідний рівень якості електропостачання. Однак, багатовекторність отриманого результату ускладнює розробку узагальнених рішень та стратегії розвитку мереж, особливо коли мова йде про розбудову ВДЕ. Тому доцільним є розроблення інтегрального показника якості функціонування електричних мереж з ВДЕ, що дозволить перейти від векторної задачі оцінювання функціональної готовності необхідного рівня якості електропостачання до скалярної.

В роботах І. А. Ушакова і Г. В. Дружиніна якість функціонування технічної системи визначається за виразом:

$$E = \sum_{\forall s} (\Phi_s H_s), \quad (1)$$

де  $H_s$  – імовірність стану  $s$ ,  $\Phi_s$  – імовірність того, що система в цьому стані функціонує.

Якість функціонування електричної мережі характеризується *надійністю, якістю електричної енергії, втратами електроенергії*. Це її властивість зберігати в часі у встановлених межах значення всіх параметрів, що характеризують здатність виконувати необхідні функції в заданих режимах і умовах експлуатації, технічного обслуговування, зберігання і транспортування.

Процес функціонування електричної мережі можна описати множиною станів, в які мережа переходить в залежності від станів її елементів. Кожен з станів характеризується імовірністю успішного виконання функцій з електропостачання. Виходячи з цього, можна говорити про граф станів (див. рис. 1), перехід зі стану в стан характеризується певною інтенсивністю відмов  $\lambda$  та відновлень  $\mu$ . В мережі з ВДЕ це також залежить від характеристик вітрових і фотоелектричних станцій (ВЕС і ФЕС), малих гідроелектростанцій (МГЕС), когенераційних установок (КГУ) та ЕЕС.

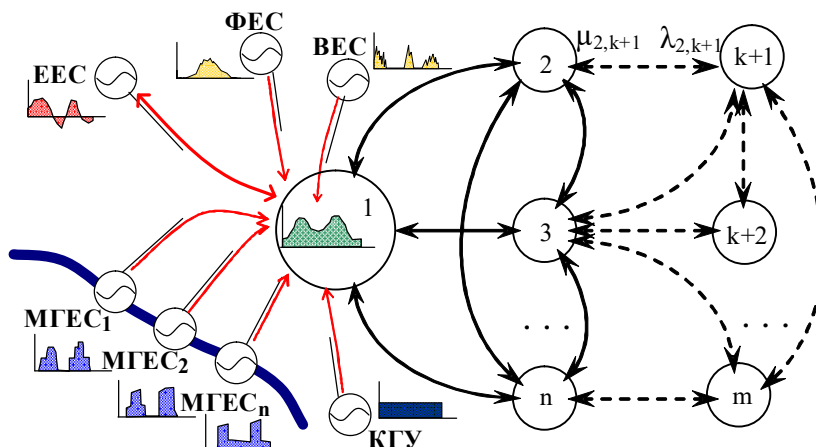


Рис. 1. Граф станів електричної мережі з відновлюваними джерелами енергії

Поєднання принципів теорії марковських процесів та теорії подібності дозволило побудувати математичну модель, яка поєднує імовірнісну складову під час визначення якості функціонування електричних мереж і зміну режимних параметрів в процесі їх функціонування.

Подібне моделювання

марковських процесів дозволяє застосувати до системи рівнянь Колмогорова-Чепмена принципи критеріального моделювання. У результаті отримано функцію, за якою можна оцінювати якість функціонування електричної мережі з відновлюваними джерелами енергії. У критеріальній формі вона матиме вигляд:

$$f(x_*) = \sum_{i=1}^m p_i \prod_{j=1}^n x_{*j}^{k_{ij}}, \quad (2)$$

де  $p_i$  – критерій подібності, який у даному випадку є ймовірністю перебування системи в  $i$ -му стані;  $\prod_{j=1}^n x_{*j}^{k_{ij}}$  – показник якості функціонування в  $i$ -му стані;  $x_{*j}$  – незалежні параметри, що характеризують основні властивості системи у відповідних станах;  $k_{ij}$  – елементи матриці переходів, яка відповідає системі рівнянь Колмогорова-Чепмена;  $m$  – кількість робочих станів;  $n$  – кількість характеристик системи;

Розглянемо двоколову лінію електропередавання (ЛЕП). Приймавши що інтенсивності відмов і відновлювань для кожного кола ЛЕП однакові, рівняння (2) прийме вигляд:

$$\begin{aligned} f(x) &= p_1 x_1^{-(\lambda_{12} + \lambda_{13})} x_2^{\lambda_{12}} x_3^{\lambda_{13}} + p_2 x_1^{\mu_{21}} x_2^{-(\lambda_{24} + \mu_{21})} x_3^0 + p_3 x_1^{\mu_{31}} x_2^0 x_3^{-(\lambda_{34} + \mu_{31})} = \\ &= p_1 \left( \frac{x_1}{x_2} \right)^{-\lambda_{12}} \left( \frac{x_1}{x_3} \right)^{-\lambda_{13}} + p_2 \left( \frac{x_2}{x_1} \right)^{-\mu_{21}} x_2^{-\lambda_{24}} + p_3 \left( \frac{x_3}{x_1} \right)^{-\mu_{31}} x_3^{-\lambda_{34}}. \end{aligned}$$

Виконаємо логарифмування і потенціювання складових, що характеризують кожен зі станів:

$$\left. \begin{aligned} \left( \frac{x_1}{x_2} \right)^{-\lambda_{12}} \left( \frac{x_1}{x_3} \right)^{-\lambda_{13}} &= e^{-\lambda_{12} \cdot (\ln(x_1) - \ln(x_2))} \cdot e^{-\lambda_{13} \cdot (\ln(x_1) - \ln(x_3))}, \\ \left( \frac{x_2}{x_1} \right)^{-\mu_{21}} x_2^{-\lambda_{24}} &= e^{-\mu_{21} \cdot (\ln(x_2) - \ln(x_1))} \cdot e^{-\lambda_{24} \cdot \ln(x_2)}, \\ \left( \frac{x_3}{x_1} \right)^{-\mu_{31}} x_3^{-\lambda_{34}} &= e^{-\mu_{31} \cdot (\ln(x_3) - \ln(x_1))} \cdot e^{-\lambda_{34} \cdot \ln(x_3)}. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Виходячи з того, що натуральний логарифм можна розцінювати як час, необхідний для досягнення змінною певного значення рівняння (3), перепишемо:

$$\left. \begin{aligned} e^{-\lambda_{12} \cdot (t_1 - t_2)} \cdot e^{-\lambda_{13} \cdot (t_1 - t_3)} &= P_{11} \cdot P_{12}, \\ e^{-\mu_{21} \cdot (t_2 - t_1)} \cdot e^{-\lambda_{24} \cdot t_2} &= P_{21} \cdot P_{22}, \\ e^{-\mu_{31} \cdot (t_3 - t_1)} \cdot e^{-\lambda_{34} \cdot t_3} &= P_{31} \cdot P_{32}, \end{aligned} \right\}, \quad (4)$$

де  $P$  – імовірності досягнення відповідних значень визначеними параметрами якості функціонування електричної мережі.

З врахуванням цього математична модель якості функціонування електричної мережі визначається за виразом:

$$E = p_1 P_{11} P_{12} + p_2 P_{21} P_{22} + p_3 P_{31} P_{32} = \sum_{i=m} \left( p_i \prod_{j=n} P_{ij} \right), \quad (5)$$

яка відповідає виразу (1), де  $p_i = H_s$  – імовірність стану,  $\prod_{j=n} P_{ij} = \Phi_s$  – імовірність того, що система в цьому стані успішно функціонує ( $P_{ij}$  – імовірність забезпечення відповідної характеристики якості функціонування).

Інтегральний показник якості функціонування в формі (5) дозволяє перейти від векторної задачі оцінювання якості функціонування до скалярної. В нього входить інформація про різні параметри електричної мережі і приймаються значення від 0 (найгірший) до 1 (найкращий) в залежності від рівня їх функціональної готовності.

У **другому розділі** розроблено методи оцінювання складових інтегрального показника якості функціонування електричних мереж (ЕМ). Показано, що використовуючи в якості базового режиму – «ідеальний» режим, можливо на єдиній методологічній основі визначати складові інтегрального показника якості функціонування електричних мереж з ВДЕ. При цьому відкривається можливість виконання порівняння різних за конфігурацією та набором потужностей електричних мереж без визначення техніко-економічних показників.

Загальні вимоги, яким має відповідати інтегральний показник: відображення об'єктивної реальності; оцінка ефективності, якості та оптимальності; можливість фізичного та абстрактного тлумачення; можливість обчислення з використанням ЕОМ; нормування і відображення «крайніх» станів ЕМ з урахуванням потенційно та реально можливих станів; повинен характеризувати окремі підсистеми і системи в цілому в усіх життєвих циклах; повинен розкладатись на часткові показники та об'єднуватись в узагальнені.

Основною задачею електричної мережі є забезпечення надійного постачання якісною електроенергією споживачів, які під'єднані до неї. Тому основні характеристики, які повинен об'єднувати інтегральний показник якості функціонування, є надійність, якість електричної енергії та економічність роботи ЕМ (рис. 2).

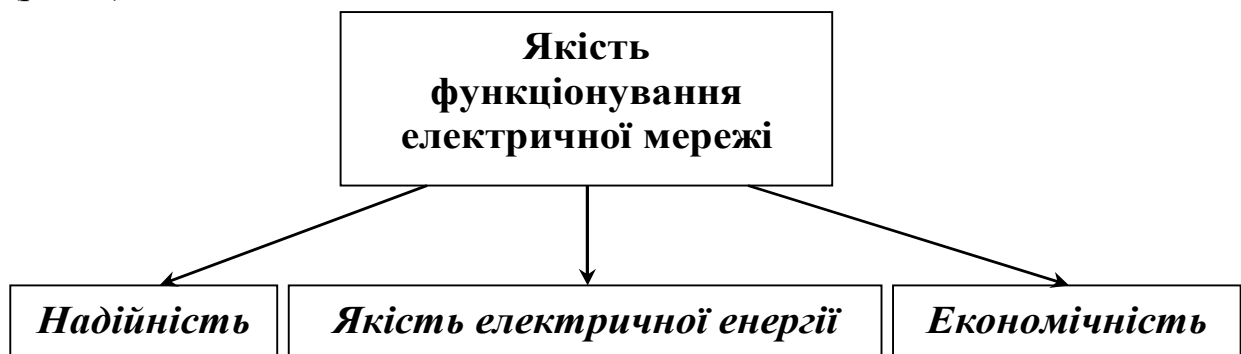


Рис. 2. Характеристики, які визначають якість функціонування електричної мережі

Нормальною схемою роботи розподільних електричних мереж є розімкнена схема. Проте з розбудовою ВДЕ в електричних мережах з'являються лінії електропередавання з двостороннім живленням. За певних режимів генерування

ВДЕ можна досягнути струморозподілу, близького до замкненої схеми мережі. Такий режим може розглядатись як «ідеальний», що відповідає мінімальному рівню втрат електричної енергії.

Перехід від розімкненої схеми до замкненої зумовлює появу струморозподілу, який залежить від параметрів елементів електричної мережі та її конфігурації. Враховуючи що процеси, пов'язані з розподілом струму в такій електричній мережі, підпорядковуються принципу найменшої дії, то можна говорити за певних умов про оптимальний режим за критерієм мінімуму втрат. Як показано на рис. 3,а з центрів живлення (ЦЖ) підтікають струми, які пропорційні задавальним струмам вузлів електричної мережі.

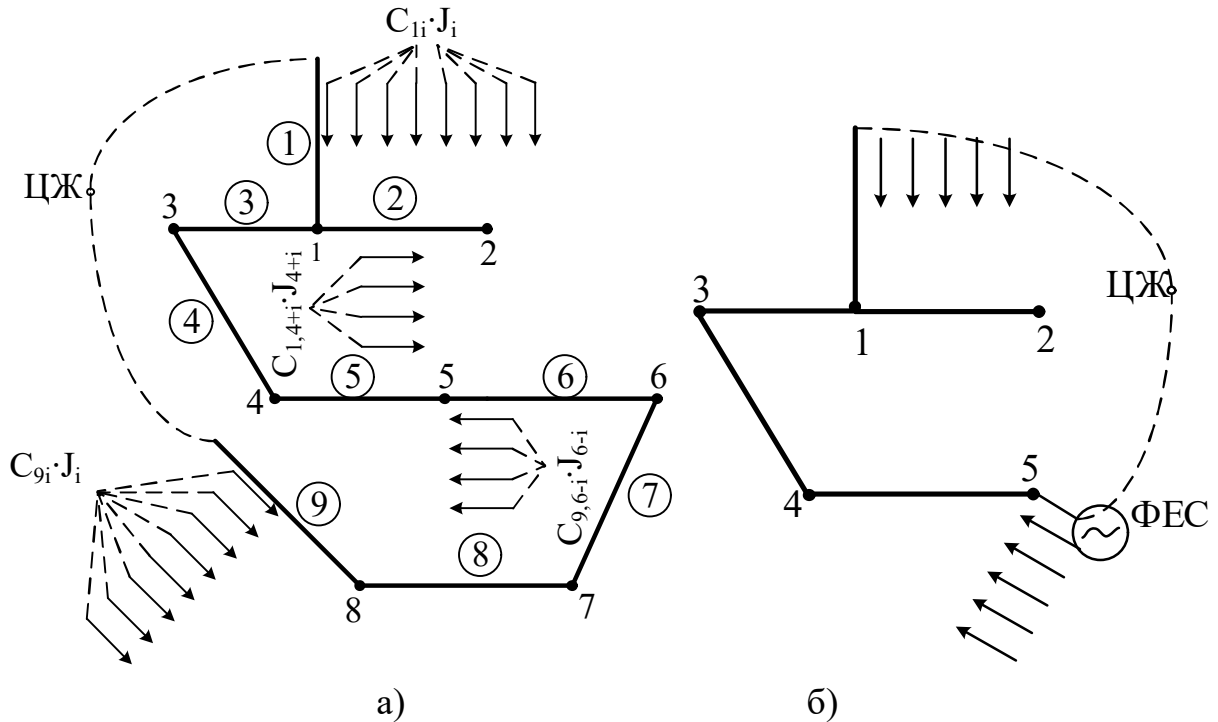


Рис. 3. Струморозподіл в електричній мережі для замкненої схеми (а) та з двостороннім живленням (б)

Коефіцієнти струморозподілу визначаються за виразом:

$$C_r = \mathbf{R}^{-1} \mathbf{M}^T (\mathbf{M} \mathbf{R}^{-1} \mathbf{M}^T)^{-1}, \quad (6)$$

де  $\mathbf{R}$  – діагональна матриця активних опорів ліній електропередавання мережі;  $\mathbf{M}$  – перша матриця з'єднань, яка формується з повної матриці  $\mathbf{M}_\Sigma$  шляхом вилучення вузлів, що відповідають центрам живлення;  $T$  – символ транспонованої матриці.

Додаткові джерела енергії можуть забезпечити в розподільних електричних мережах режим, близький до режиму замкненої мережі за перетоками струмів  $i$ , як наслідок, мінімізувати втрати електричної енергії (рис. 3,б). Для підтвердження сказаного вище в дисертації досліджено умови і принципи оптимального розподілу активних і реактивних потужностей в електричних мережах з двохстороннім живленням, що утворилися в результаті під'єднання ВДЕ.

Показано, застосовуючи принцип найменшої дії у формі Гамільтона, що оптимальні значення струмів у вітках мережі  $\mathbf{I}_0$  визначаються як

$$\dot{\mathbf{I}}_0 = \mathbf{C}_r \mathbf{J}_a + j \mathbf{C}_r \mathbf{J}_p, \quad (7)$$

де  $\mathbf{J}_a, \mathbf{J}_p$  – вектори активних і реактивних струмів у вузлах схеми ЕМ.

В результаті можна зробити висновок, що в мережі з декількома джерелами живлення мінімальні втрати активної потужності для випадку, коли на значення вузлових струмів не накладено ніяких обмежень, мають місце тоді, коли і активна, і реактивна складові струмів розподіляються в електричній мережі в залежності тільки від активних опорів, тобто відповідно заступній  $r$ -схемі мережі. Цей результат узгоджується з принципом найменшої дії.

Отримані коефіцієнти струморозподілу не змінюються від режиму до режиму і сума відповідних коефіцієнтів дорівнює одиниці, а тому можуть розглядатись як коефіцієнти подібності. Тому, враховуючи подібність режимів електричної мережі, можна констатувати відповідність «ідеальному» режиму для різних потужностей генерування та споживання. Вони лише мають відповідати струморозподілу в мережі коефіцієнтам  $\mathbf{C}_r$ .

Достовірність отриманих результатів підтверджують результати моделювання, показані на рис. 4. Для схеми, показаної на рис. 3,б, виконано розрахунок, коли генерування ВДЕ пропорційно потужностям споживання – крива 1 (коефіцієнти

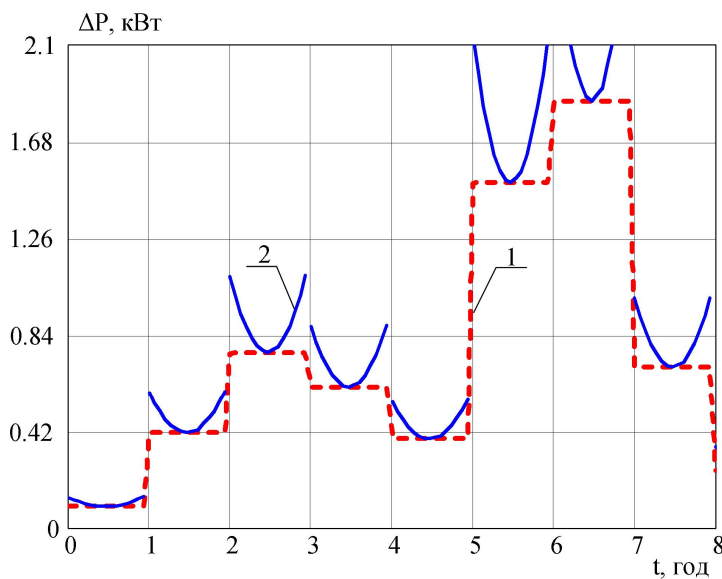


Рис. 4. Зміна втрат потужності протягом доби

1 – режим втрат, що відповідають «ідеальному» (базовому), 2 – довільний режим генерування в околі «ідеального»

пропорційності відповідають коефіцієнтам струморозподілу  $\mathbf{C}_r$  за  $r$ -схемою) і коли генерування змінюється в довільних межах – крива 2.

В подальшому складові інтегрального показника визначаються як імовірності відповідності параметрів електричної мережі з ВДЕ базовому («ідеальному») режиму.

Застосування теорії марковських процесів під час побудови моделі інтегрального показника якості функціонування дозволяє: по-перше, виконати декомпозицію задачі оцінювання якості функціонування електричних мереж за рахунок розбиття процесу функціонування на стани, в межах

яких аналізуються режимні параметри; по-друге, врахувати структурну надійність.

Однак, експоненціальний розподіл випадкової події, який є обов'язковою умовою застосування марковських моделей, не завжди виконується, особливо коли мова йдеться про час відновлення або перемикання. Часом ідуть на використання однорідних марковських моделей і у випадках, для яких не виконується експоненціальний розподіл для всього процесу функціонування системи, обґрунтовуючи відсутністю можливості проведення аналітичних обчислень іншими

методами. В роботі запропоновано, у випадках коли використання однорідних марковських моделей призводить до значних похибок, використовувати Вейбулл-Марковську модель, яка є напівмарковською. В цій моделі використовується розподіл Вейбулла для всіх випадкових величин, які характеризують процес функціонування. При цьому, за рахунок «попередньої обробки» можна оцінити властивості системи, додавши вклад кожного елемента системи. Імовірності станів обчислюються за вкладеною мережею Маркова. Тобто, запропонована модель містить однорідну марковську модель в якості підмножини і дозволяє працювати з дзвоноподібними розподілами.

В умовах розбудови ВДЕ в розподільних електричних мережах необхідно оцінювати балансову надійність, тобто визначення імовірності неспівпадання графіків споживання і генерування ВДЕ, зумовлену нестабільністю таких джерел.

За статистичними даними, використовуючи математичний апарат гаусових сумішей, можна оцінити імовірність відповідності генерування і споживання

$P_i \left( \sum_{k=1}^m P_{ВДЕ_{i,k}} = \sum_{j=1}^n P_{i,j} \right)$  для певного  $i$ -го часу доби. Очевидно, що аналіз полягає у

порівнянні сумарного генерування ВДЕ фідера з його сумарним навантаженням. Оскільки розглядається погодинний графік, то вираз для визначення імовірності забезпечення балансу приймає вид:

$$P_{\sigma} = \frac{1}{24} \sum_{i=1}^{24} P_i \left( \sum_{k=1}^m P_{ВДЕ_{i,k}} = \sum_{j=1}^n P_{i,j} \right), \quad (8)$$

де  $m, n$  – відповідно кількість джерел та вузлів споживання.

Оцінювання економічності функціонування електричної мережі з відновлюваними джерелами енергії ґрунтуються на оцінюванні відповідності фактичного режиму базового шляхом аналізу статистичних даних на виконання

умови  $P_{ВДЕ_{i,k}} = \sum_{j=1}^n (C_{r_{k,j}} \cdot P_{i,j})$  для кожної  $i$ -ї години доби і визначення імовірності за

виконаним аналізом.

Імовірність забезпечення базового режиму визначається за виразом:

$$P_{\Delta P} = \frac{1}{24} \sum_{i=1}^{24} \left[ \prod_{k=1}^m P_{i,k} \left( P_{ВДЕ_{i,k}} = \sum_{j=1}^n (C_{r_{k,j}} \cdot P_{i,j}) \right) \right]. \quad (9)$$

Під час оцінювання складової забезпечення якості електричної енергії в роботі основна увага приділялась забезпеченню нормативних відхилень напруги у вузлах та спотворення кривої напруги, оскільки найбільший вплив ВДЕ мають саме на ці показники.

Для оцінювання відхилення напруги у вузлах споживання скористаємось підходом, який ґрунтується на понятті «ідеального» режиму, який приймається за базовий. В «ідеальному» режимі спади напруги і, як наслідок, відхилення напруги у вузлах мережі менші. Це підтверджують результати моделювання, наведені на рис. 5, де крива 1 довільний режим, а крива 2 – базовий режим.



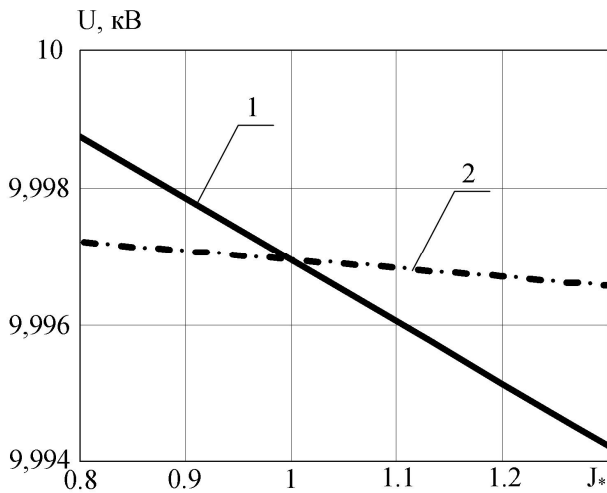


Рис. 5. Результати моделювання рівнів напруги у вузлі 3 (див. рис. 3 б): крива 1 – довільний режим; крива 2 – базовий режим

навантаження по відношенню до струмів генерування ВДЕ шляхом побудови множини кривих для конкретної електричної мережі (див. рис. 6). Ця область буде відповідати нормативним відхиленням напруги у вузлах навантаження.

Шляхом аналізу статистичних даних можна визначити імовірність виконання

умови  $J_{ВДЕ \min i,k} \leq \sum_{j=1}^n (C_{r j,k} \cdot J_{i,j}) \leq J_{ВДЕ \max i,k}$  для кожної  $i$ -ї години доби. Складова

якості напруги в інтегральному показнику визначається за виразом:

$$P_U = \frac{1}{24} \sum_{i=1}^{24} \left[ \prod_{k=1}^m p_{i,k} \left( J_{ВДЕ \min i,k} \leq \sum_{j=1}^n (C_{r j,k} \cdot J_{i,j}) \leq J_{ВДЕ \max i,k} \right) \right]. \quad (13)$$

Тобто, відповідно до отриманих залежностей (див. рис. 6) визначаються межі допустимого генерування ВДЕ і аналіз відповідності відхилень напруги у вузлах споживання зводиться лише до аналізу співвідношення струмів генерування та споживання.

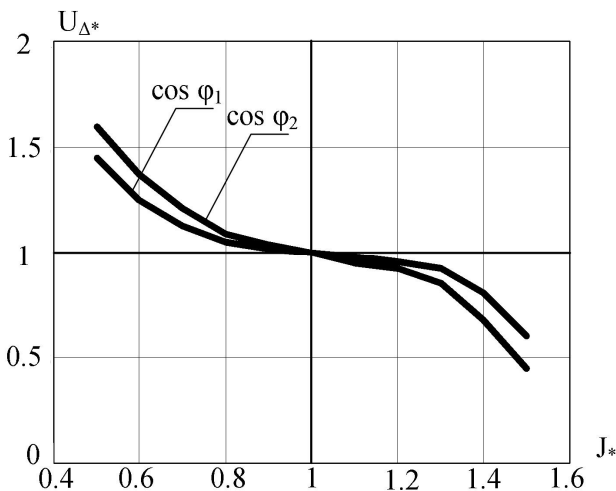


Рис. 6. Криві  $U_{*\Delta} = f(J_{*i})$  для конкретної мережі

Для визначення спадів напруги в базовому режимі скористаємось виразом:

$$\Delta U = \sqrt{3} \cdot \mathbf{Z} \cdot \mathbf{C}_r \cdot \mathbf{J}_H. \quad (10)$$

За виразом залежності між спадом напруги у вітці і відхиленням напруги у вузлі по відношенню до базисного вузла:

$$\Delta \mathbf{U} = \mathbf{M}^T (\mathbf{U} - \mathbf{n} \cdot U_\delta), \quad (11)$$

та (10) можна визначити відхилення напруги у вузлі по відношенню до базисного:

$$U_\Delta = \sqrt{3} \cdot \mathbf{C}^T \cdot \mathbf{Z} \cdot \mathbf{C}_r \cdot \mathbf{J}_H. \quad (12)$$

За виразом (12) можна побудувати залежність  $U_\Delta = f(J_i)$  для базового режиму. За цією залежністю можна отримати область зміни струмів

генерування та споживання.

Підходи, використанні під час

розроблення методу аналізу відхилень

напруг у вузлах електричної мережі,

дозволяють розробити метод оцінювання

складової якості електричної енергії в

інтегральному показнику, яким

враховуються ненормативні відхилення

показника несинусоїдності напруг.

В роботах Інституту

електродинаміки НАН України

запропоновано коефіцієнт спотворення,

який визначається за виразом:

$$K_C^Y = \sqrt{A_V K_{2U}^2 + B_V \sum_{n=2}^{\infty} \left( K_{U(n)}^2 / n\sqrt{n} \right)} \leq 1\%, \quad (14)$$

де  $A_V$  і  $B_V$  – коефіцієнти, що залежать від класу напруги.

За цим коефіцієнтом можна визначити рівень допустимих спотворень для кожного з вузлів живлення в залежності від особливостей споживачів.

Враховуючи, що основна частина спотворень в розподільних електричних мережах 10 кВ і вище є несинусоїдність струмів і напруг, то далі мова йтиме саме про них.

Скористаємось підходом, який був використаний для визначення відхилень напруги у вузлах. Для цього перетворимо вираз (12) до виду:

$$U_{\Delta v} = \sqrt{3} \cdot C^T \cdot Z_v \cdot C_v \cdot J_{Hv}, \quad (15)$$

де  $Z_v$  – діагональна матриця опорів елементів електричної мережі для  $v$ -ї гармоніки;  $C_v$  – матриця коефіцієнтів струморозподілу, яка визначається за виразом  $C_v = Z_v^{-1} M^T (M Z_v^{-1} M^T)^{-1}$ ;  $J_{Hv}$  – матриця спотворень по струму на  $v$ -й гармоніці в точці приєднання навантаження.

За значенням допустимих спотворень за напругою, отриманих за коефіцієнтом (14), та за спотворенням струму (15) можемо отримати допустиму ін'єкцію спотворень за напругою від джерела цих спотворень:

$$U_{дж\_v} = U_{б\_v} - (\Delta U_{v\Sigma} + U_{\Delta v}).$$

де  $U_{б\_v}$  – спотворення у базисному вузлі;  $\Delta U_{v\Sigma}$  – сума спадів напруги на шляху до джерела спотворень.

З врахуванням отриманих результатів імовірність забезпечення якості електричної енергії за несинусоїдністю напруги можна визначати за виразом:

$$P_{KU} = \frac{1}{24} \sum_{i=1}^{24} \left[ \prod_{v=1}^{40} \left( \prod_{k=1}^m p_{i,v,k} (U_{дж\ i,v,k} \leq U_{дж\_дон\ i,v,k}) \right) \right]. \quad (16)$$

У **третьому розділі** розглянуто принципи комплексного оцінювання якості функціонування з врахуванням індивідуальних особливостей споживачів. Показано алгоритмічну і програмну реалізацію розроблених методів. Запропоновано метод переходу від відносного оцінювання якості функціонування електричних мереж з ВДЕ за допомогою інтегрального показника до техніко-економічного.

Поява джерел електричної енергії в розподільних електричних мережах надає їм ознак локальної електричної системи. Розроблений підхід для оцінювання якості функціонування дозволяє дати оцінку не лише поточному стану електричних мереж, але й оцінити перспективи розбудови в них відновлюваних джерел енергії. Інтегрування в одному показникові характеристик різних сторін функціонування електричних мереж дозволяє перейти від векторної задачі до скалярної (див. рис. 7). Цим можна спростити побудову алгоритмів оптимізації розвитку електричних мереж з врахуванням відновлюваних джерел енергії в них.

Методи отримання складових інтегрального показника якості функціонування, розроблені в розділі 2, дозволяють визначити коефіцієнт якості функціонування електричної мережі в  $i$ -му стані. Вираз має такий вигляд:

$$\Phi_i = P_{\delta i} \cdot P_{\Delta P i} \cdot P_{U i} \cdot P_{K U i}, \quad (17)$$

де  $P_{\delta i}$  – імовірність забезпечення балансової надійності;  $P_{\Delta P i}$  – імовірність відповідності фактичних режимів «ідеальному» за втратами активної потужності;  $P_{U i}$  – імовірність забезпечення нормативних відхилень напруги у вузлах мережі;  $P_{K U i}$  – імовірність забезпечення нормативних спотворень синусоїди напруг.

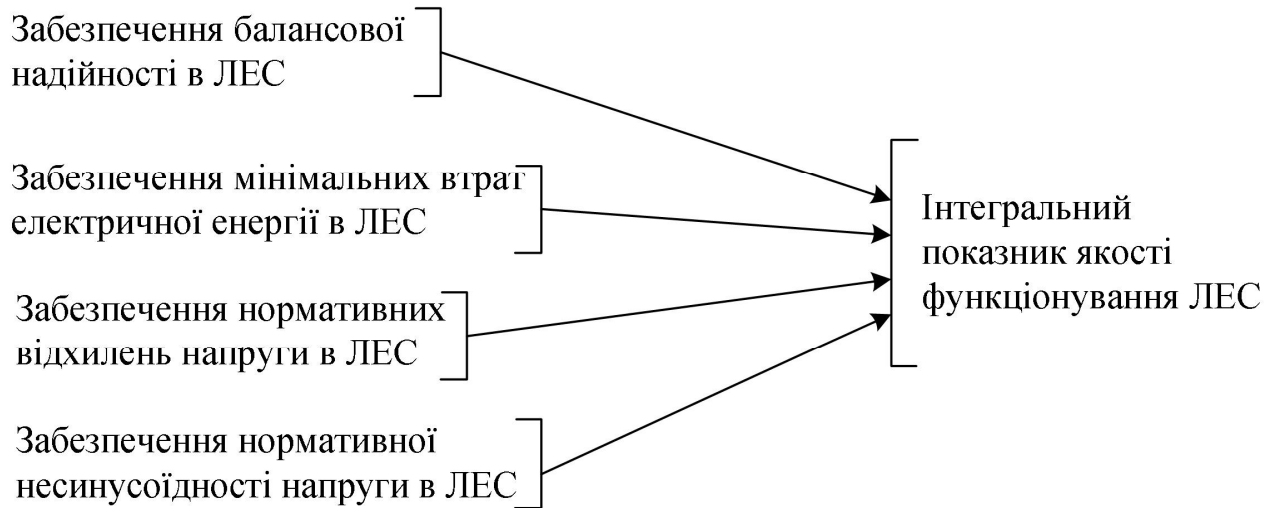


Рис. 7. Формування інтегрального показника якості функціонування локальної електричної системи

Завдяки тому, що за базовий режим прийнято «ідеальний» режим, то за показником якості функціонування можна порівнювати різні електричні мережі між собою. Це дозволяє аналізувати різні схемні рішення між собою і розробляти напрямки їх вдосконалення. Під час розроблення стратегій реконструкції електричних мереж необхідно враховувати індивідуальні особливості споживачів. Тобто, для системи електропостачання можуть бути висунуті умови для того, щоб приділити особливу увагу до якоїсь однієї або декількох складових інтегрального показника якості. Для цього в показник якості функціонування електричної мережі вводяться вагові коефіцієнти. Тоді вираз для інтегрального показника якості функціонування електричної мережі приводиться до виду:

$$E_k = \sum_{i=m} \left( p_i \left( P_{\delta 1,i}^\alpha \cdot P_{\Delta P 2,i}^\beta \cdot P_{U 3,i}^\chi \cdot P_{K U 4,i}^\eta \right) \right), \quad (18)$$

де  $\alpha, \beta, \chi, \eta$  – вагові коефіцієнти ( $\alpha + \beta + \chi + \eta = 1$ ).

Запропонована в роботі методологія оцінювання якості функціонування електричної мережі не накладає обмежень на метод визначення вагових коефіцієнтів.

Надання переваги одним зі складових показника функціональної готовності електричних мереж впливає на значення інтегрального показника. Так, на рис. 8 показано залежність  $E = f(P_\delta)$  для випадку, коли надається перевага надійності електропостачання над якістю електроенергії і економічністю.

На основі інтегрального показника якості функціонування електричної мережі розроблено метод техніко-економічного оцінювання електричної мережі. Для схеми,

наведеної на рис. 3,б) виконано оцінювання доцільності робіт з відновлення ліній електропередач.

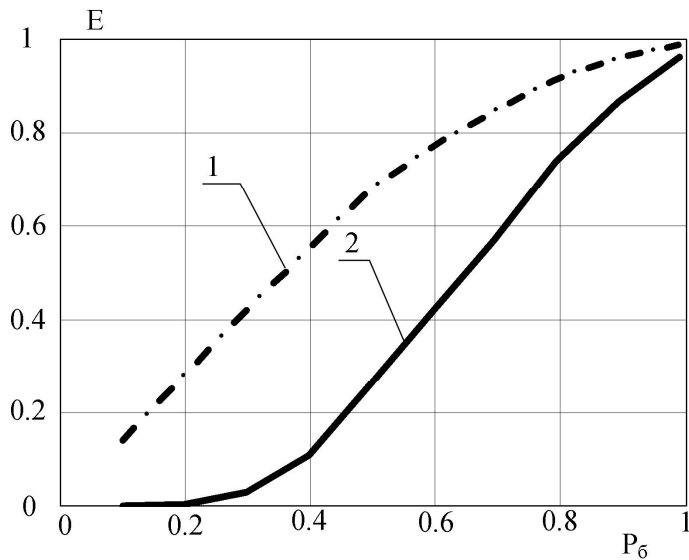


Рис. 8. Залежність  $E = f(P_0)$  для випадку надання переваги надійності електропостачання над якістю електроенергії і економічністю (крива 1) та без виділення окремих складових (крива 2)

Після проведення необхідного об'єму відновлювальних робіт планується досягнути бажаного рівня надійності. Зміна показника якості функціонування при цьому показана на рис. 9 (вибрані місяці з найгіршими показниками).

Для виконання аналізу оцінок робочої схеми до реконструкції, ремонтної схеми та робочої схеми після реконструкції виконано відповідні розрахунки, які показано на рис. 10 для 10-го місяця (а) та для 11-го місяця (б). В розрахунках вартості втраченої, недовідпущеної та за неякісної електричної енергії взяті на рівні середніх по галузі.

Аналіз отриманих результатів дозволяє констатувати, що за такого рівня готовності розглянутої електричної мережі по відношенню до вузла б реконструкція мережі не призведе до суттєвого виграшу. Якщо такий висновок можна зробити за рештою вузлів, то капіталовкладення варто використати на інші заходи з підвищення якості функціонування, наприклад, для підвищення якості електричної енергії.

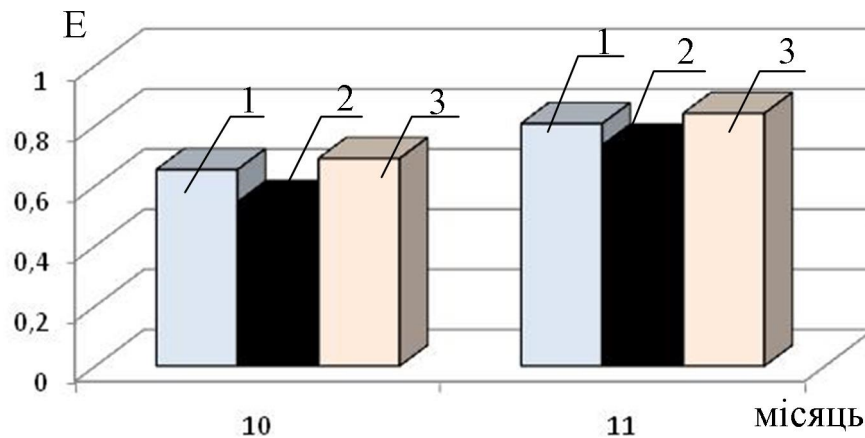


Рис. 9. Зміна показника якості функціонування з врахуванням надійності та якості електричної енергії (1 – робоча схема до реконструкції; 2 – ремонтна схема; 3 – робоча схема після реконструкції)

За значеннями складових узагальненої техніко-економічної оцінки (рис. 10) можна планувати заходи з подальшого покращення якості функціонування

розподільних електричних мереж. Використання інтегрального показника якості функціонування розподільної електричної мережі дозволяє побудувати відносно не складний алгоритм техніко-економічної оцінки ефективності відновлювальних робіт. За цим алгоритмом можна оцінити реальний рівень якості функціонування та рівень після реконструкції. Порівнюючи затрати, можна зробити висновок щодо доцільності запланованих заходів.

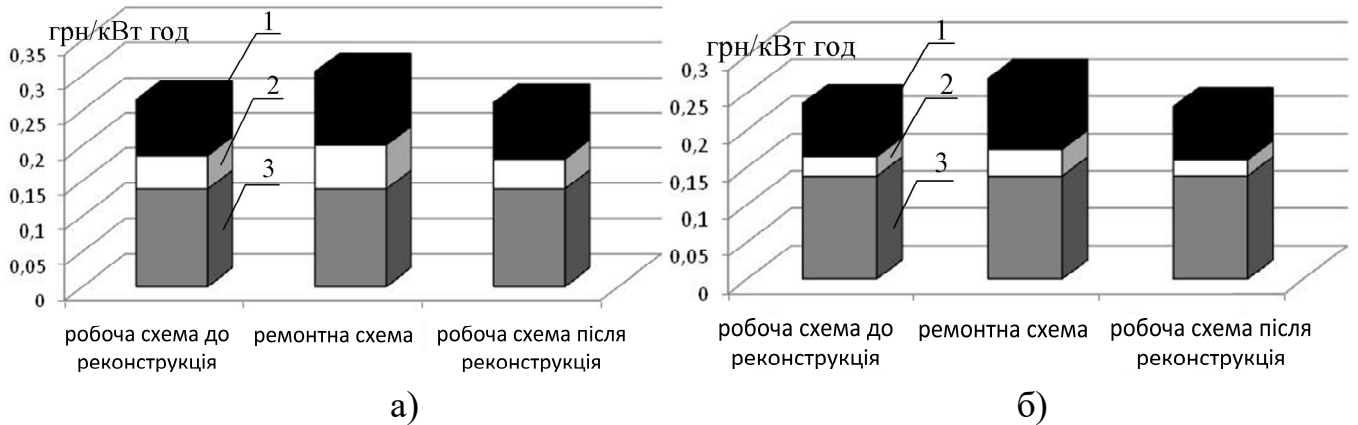


Рис. 10. Зміна узагальненої техніко-економічної оцінки  
(1 – складова надійності; 2 – складова якості електричної енергії; 3 – складова втрат електричної енергії)

Отриманий інтегральний показник якості функціонування електричних мереж дозволяє оцінювати ефективність і оптимальність; нормувати і відобразити «крайні» стани системи з врахуванням потенційно і реально можливих; розкладатись на частинні показники.

У **четвертому розділі** показана ефективність застосування динамічних моделей для розроблення оптимальної стратегії розвитку електричних мереж з відновлюваними джерелами енергії. Отримано аналітичні умови визначення оптимальної стратегії з множини можливих, які враховують зміну інтегрального показника якості функціонування електричної мережі.

Під час вибору оптимального варіанту розвитку електричної мережі розв'язується задача мінімізації затрат на її реконструкцію і експлуатацію. Формулюється задача так: необхідно забезпечити заданий рівень якості функціонування електричної мережі за мінімальних приведених затратах на її реконструкцію та експлуатацію.

Споживач може отримувати живлення по  $m$  варіантах схеми електричної мережі (варіанти схеми залежать від стану, в якому перебуває електрична мережа в наслідок відмови певних її елементів). Необхідно забезпечити заданий рівень якості функціонування  $E'_{зад}$  так, щоб приведені затрати на реконструкцію та експлуатацію були найменші. Отже, задача зводиться до мінімізації

$$Z = \sum_{i=1}^m Z_i(E'_i) \quad (19)$$

за обмеження

$$1 - E'_{\text{зад}} = \prod_{i=1}^m (1 - E'_i) \text{ або } \ln(1 - E'_{\text{зад}}) = \sum_{i=1}^m \ln(1 - E'_i), \quad (20)$$

де  $Z_i(E'_i) = Z_{pi} + Z_{ei}$  – затрати на реконструкцію та експлуатацію  $i$ -ої схеми розподільної мережі;  $Z_{pi}$  і  $Z_{ei}$  – затрати відповідно на реконструкцію та експлуатацію;  $i$  – варіант схеми електропостачання,  $E'_i$  – показник якості функціонування для  $i$ -ої схеми розподільної мережі;  $m$  – загальна кількість робочих станів електричної мережі.

Оскільки дослідження відносної зміни величини затрат має ряд переваг над дослідженням абсолютних значень, то перейдемо до відносних величин:

$$\delta Z_i(E'_i) = \frac{Z_i(E'_i) - Z_{i0}(E'_i)}{Z_{i0}(E'_i)} = \frac{Z_i(E'_i)}{Z_{i0}(E'_i)} - 1 = \bar{Z}_i - 1,$$

де  $E'_{i0}$  – показник якості функціонування вихідної схеми.

Використовуючи метод базової точки переходимо від (19) до критеріального рівняння виду:

$$y = \sum y_i(E'_i), \quad (21)$$

де  $y_i(E'_i) = \Theta'_{pi} F_{pi}(E'_i) + F_{ei}(E'_i)$  – безрозмірна функція, що підлягає мінімізації, дорівнює  $\frac{\delta Z_i(E'_i)}{A_{ei} \bar{Z}_{ei}}$ ,  $\Theta'_{pi} = \frac{A_{pi} \bar{Z}_{pi}}{A_{ei} \bar{Z}_{ei}}$  – критерії подібності;  $F_{pi}(E'_i)$ ,  $F_{ei}(E'_i)$  – функції, які визначають фізичні зв'язки в мережі відповідно для реконструкції та експлуатації;  $A_{pi}$ ,  $A_{ei}$  – функції, які включають в себе вихідні питомі вартісні показники, відповідно реконструкції та експлуатації.

Рівняння (21) інваріантне по відношенню до будь-яких змін вартості і технічних показників, що не змінюють значення  $\Theta'_{pi}$ . Це дозволяє розв'язок узагальнити для ряду інших випадків.

З врахуванням (21) задача переписеться мінімізувати

$$y = \sum_{i=1}^m y_i(E'_i)$$

за обмеження

$$1 - E'_{\text{зад}} = \prod_{i=1}^m (1 - E'_i) \text{ або } \ln(1 - E'_{\text{зад}}) = \sum_{i=1}^m \ln(1 - E'_i).$$

Для розв'язання задачі використаємо метод невизначених множників Лагранжа. Функцію Лагранжа представимо у вигляді

$$L(E'_1, \dots, E'_n) = \sum_{i=1}^m y_i + \lambda \sum_{i=1}^m \ln(1 - E'_i),$$

де  $\lambda$  – невизначений множник Лагранжа.

Для визначення  $\lambda$  розв'яжемо систему рівнянь:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial L(E'_1, \dots, E'_n)}{\partial E'_i} \\ \ln(1 - E'_{зад}) = \sum_{i=1}^n \ln(1 - E'_i) \end{array} \right. ;$$

$$\frac{\partial}{\partial E'_i} \left[ \sum_{i=1}^m y_i(E'_i) + \lambda \sum_{i=1}^m \ln(1 - E'_i) \right] = \frac{\partial y_i}{\partial E'_i} - \lambda \frac{1}{1 - E'_i} = 0.$$

Тоді

$$\frac{\partial y_i}{\partial E'_i} = \lambda \frac{\partial E'_i}{1 - E'_i}; \quad y_i(E'_i) = -\lambda \cdot \ln(1 - E'_i) + C_i.$$

Постійну інтегрування  $C_i$  визначаємо з граничних умов: для  $E'_i = E'_{i0}$ ,  $y_i = y_{i0} = 1$ , де  $E'_{i0}$  і  $y_{i0}$  – показник якості функціонування вихідної схеми і відносний приріст затрат на цю схему відповідно:

$$\begin{aligned} C_i &= 1 + \lambda \cdot \ln(1 - E'_{i0}); \\ y_i &= 1 - \lambda \cdot \ln(1 - E'_i) + \lambda \cdot \ln(1 - E'_{i0}); \\ \ln(1 - E'_i) &= \frac{1 - y_i}{\lambda} + \ln(1 - E'_{i0}). \end{aligned} \quad (22)$$

Підставимо (22) в (20), отримаємо

$$\frac{1}{\lambda} \sum_{i=1}^m (1 - y_i) + \sum_{i=1}^m \ln(1 - E'_{i0}) = \ln(1 - E'_{зад}).$$

Звідки

$$\lambda = \frac{\sum_{i=1}^m (1 - y_i)}{\ln \left( \frac{1 - E'_{зад}}{\prod_{i=1}^m (1 - E'_{i0})} \right)}. \quad (23)$$

Після підстановки (23) у вираз (22) приходимо до системи з  $m$  рівнянь з невідомими  $E'_i$ :

$$\ln(1 - E'_i) = \frac{1 - y_i}{\sum_{i=1}^m (1 - y_i)} \ln \left( \frac{1 - E'_{зад}}{\prod_{i=1}^m (1 - E'_{i0})} \right) + \ln(1 - E'_{i0}). \quad (24)$$

З (24) визначаються  $E'_i$  схем розподільної електричної мережі, які відповідають можливим її станам та будуть забезпечувати загальний заданий рівень якості функціонування  $E'_{зад}$ .

Відповідно до викладеного вище матеріалу можна сформулювати перший етап ітераційного процесу визначення оптимальної стратегії реконструкції електричної мережі. Тобто, на першому етапі, під час розгляду можливих станів електричної

мережі в яких вона перебуває в наслідок зміни стану її елементів, визначаються ті, найбільш імовірні схеми електричної мережі, які мають найбільший вплив на значення інтегрального показника якості функціонування. На основі аналізу на чутливість визначено складові якості функціонування з визначальним впливом на інтегральний показник для відповідних схем. За цим аналізом формується множина заходів  $N^n$  для досягнення  $E'_{зад}$ . Тобто, в результаті виконання першого етапу виконується декомпозиція загальної задачі отримання заданого значення інтегрального показника якості функціонування на підзадачі, в яких аналізуються окремі випадки відповідно до графу можливих станів електричної мережі.

Наступним етапом методу є вибір оптимальної стратегії реконструкції окремого варіанту схеми електричної мережі з суттєво меншою множиною можливих стратегій. Однак, для вибору оптимальної стратегії розвитку електричної мережі необхідно отримати умови, за якими можна з множини стратегій вибрати оптимальну за затратами на досягнення заданого значення інтегрального показника якості функціонування.

Отже, на першому етапі отримано значення інтегрального показника якості функціонування  $E'_i$ , значення якого ми повинні досягнути в результаті виконання певних заходів з реконструкції  $i$ -ої схеми.

Скористаємось підходом, який був використаний на першому етапі. Сформуємо задачу оптимізації для окремої схеми у вигляді (19), але з врахуванням того, що  $E''_i$ , отримане на першому етапі, на другому відповідає  $E''_{i\text{зад}}$ . Тобто, відповідає заданому значенню інтегрального показника якості функціонування для певної схеми електричної мережі. З врахуванням цього (20) переписеться:

$$\ln(1 - E''_{i\text{зад}}) = \sum_{i=1}^{N^n} \ln(1 - E''_i),$$

де  $N^n$  – множина альтернативних заходів, щодо розвитку мережі.

Для розв'язання цієї задачі скористаємось методом невизначених множників Лагранжа (приймаємо допущення про неперервність змінних).

Функція Лагранжа для цієї задачі буде мати вид:

$$L(E_1^n, \dots, E_{N^n}^n) = \sum_{i=1}^{N^n} Z_i + \lambda \prod_{i=1}^{N^n} (1 - E_i^n). \quad (25)$$

Продиференціювавши (25) по змінних  $i$  прирівнявши їх до нуля, отримаємо систему рівнянь виду:

$$\begin{cases} \frac{\partial Z_i}{\partial E_i^n} - \lambda \prod_{\substack{S=1 \\ S \neq i}}^{N^n} (1 - E_S^n) = 0; \\ \frac{\partial Z_k}{\partial E_i^n} - \lambda \prod_{\substack{S=1 \\ S \neq k}}^{N^n} (1 - E_S^n) = 0. \end{cases}$$

Розв'язком цієї системи рівнянь буде:



$$\frac{\frac{\partial Z_i}{\partial E_i} \prod_{\substack{S=1 \\ S \neq k}}^{N^n} (1 - E_k)}{\frac{\partial Z_k}{\partial E_k} \prod_{\substack{S=1 \\ S \neq i}}^{N^n} (1 - E_S)} = \frac{\frac{\partial Z_i}{\partial \ln(E_i)}}{\frac{\partial Z_k}{\partial \ln(E_k)}} = 1 \text{ або } \frac{\partial Z_i}{\partial \ln(E_i)} = \frac{\partial Z_k}{\partial \ln(E_k)}. \quad (26)$$

Графічна інтерпретація (26) показана на рис. 11.

Вираз (26) є узагальненою умовою вибору оптимальної стратегії розвитку електричної мережі. Враховуючи дискретність невідомих умова оптимальності переписується

$$\frac{\partial Z_i}{\partial \ln(E_i)} \approx \frac{\partial Z_k}{\partial \ln(E_k)}.$$

На другому етапі оптимальна стратегія вибирається за умовою (26) шляхом порівняння відношення приростів для можливих схем електричної мережі, які відповідають графу станів її функціонування.

У п'ятому розділі розглянуто відновлювані джерела енергії як засіб підвищення якості функціонування електричних мереж. Проведено моделювання засобами Matlab технічних особливостей ВДЕ і зроблено пропозиції щодо вибору режимів їх роботи для підвищення якості функціонування електричних мереж, до яких вони під'єднанні. Розроблено методи визначення оптимальної встановленої потужності ВДЕ, приєднуваної до певного вузла мережі за критерієм якості функціонування, та метод узгодження графіків генерування та споживання електроенергії.

На сьогодні у ПАТ «Вінницяобленерго» активно розбудовуються ВДЕ, зокрема фотоелектричні станції (ФЕС). Так, у 2017–18 роках потужність ФЕС у «Вінницяобленерго» збільшилась на 66,3 МВт і склала 160,7 МВт. Тому, як приклад, для ілюстрації розроблених в роботі методів та алгоритмів доцільно розглянути електричні мережі «Вінницяобленерго». Для аналізу статистичних даних взято одну з його районних електричних мереж (РЕМ). Розглянуто варіант, коли ВДЕ (ФЕС і малі ГЕС) розбудовуються без суттєвої зміни в схемі РЕМ.

На рис. 12 показано імовірність забезпечення графіка електроспоживання Ф-15 Гальжбіївською ФЕС Ямпільських РЕМ. Значення потужності генерування ФЕС представлено у відносних одиницях від фактично встановленої потужності  $P_{\text{вст. ФЕС}} = 1,431$  МВт. Застосувавши для аналізу і оцінювання інтегральний показник якості функціонування для визначення оптимальної встановленої потужності ВДЕ, встановлено допустиму потужність розбудови ВДЕ. Результати розрахунків показують, що для забезпечення якісного електропостачання оптимальною була б

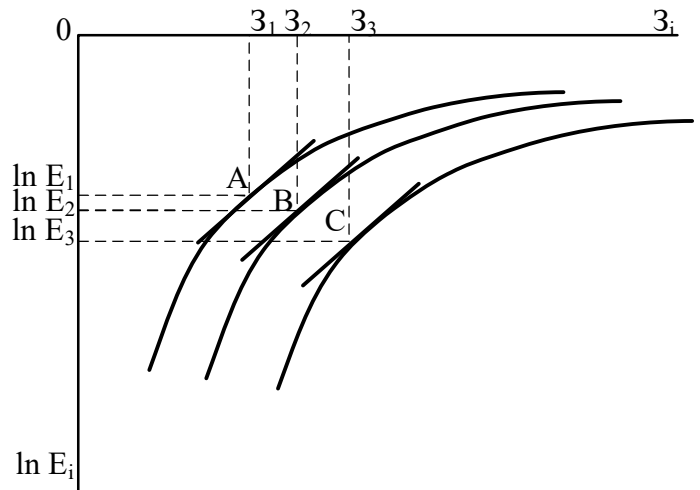


Рис. 11. Графічна інтерпретація приростів  $\ln(E_i) = f(z_i)$

потужність ФЕС в діапазоні 47–80% від фактично встановленої. А саме, рекомендована потужність ФЕС має становити 0,95 МВт. Результат залежності якості функціонування електричної мережі з ВДЕ для найбільш імовірного стану в залежності від встановленої потужності генерування ФЕС наведено на рис. 13. Показник якості функціонування для оптимальної потужності ФЕС становить  $E_{я\_opt.ФЕС} = 0,41$ .

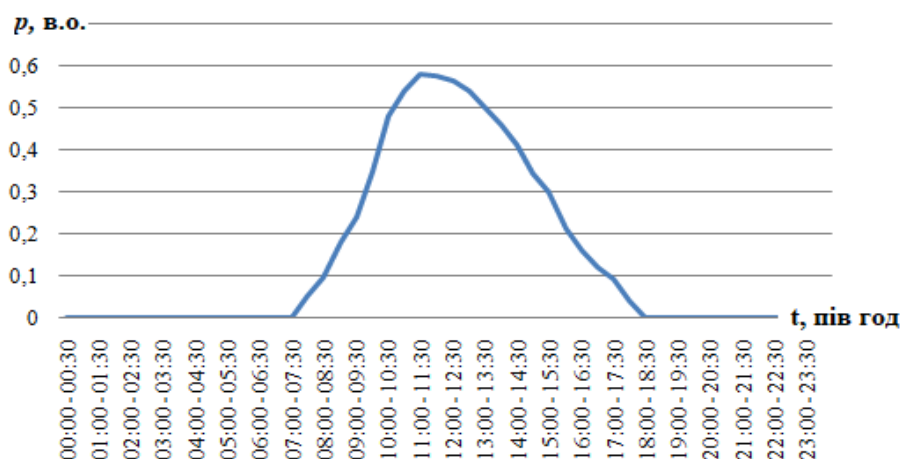


Рис. 12. Імовірність покриття графіка навантаження Ф-15 генеруванням Гальжбіївської ФЕС

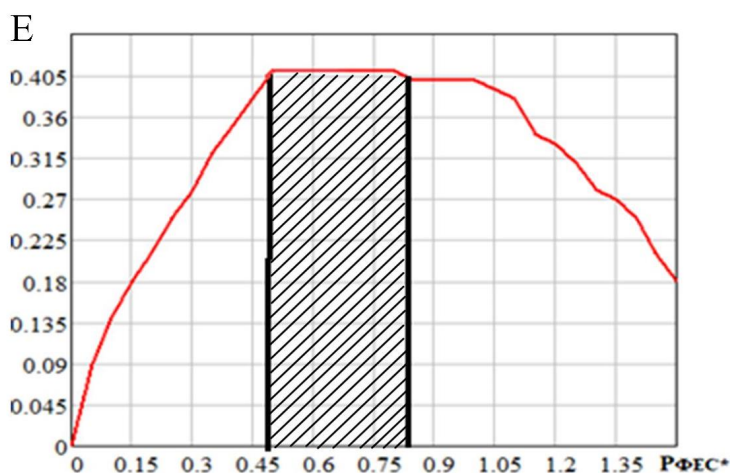


Рис. 13. Визначення оптимальної встановленої потужності Гальжбіївської ФЕС для фідера Ф-15 Ямпільських РЕМ

Для цієї ж схеми мережі на рис. 14 показано результати розрахунку добових втрат електроенергії протягом року. Відповідно розглянуто три випадки:

- без врахування генерування ФЕС (крива 1);
- з генеруванням ФЕС при оптимальній (за запропонованим методом) її встановленій потужності (950 кВт) (крива 2);
- з генерацією ФЕС встановленої потужності 1,43 МВт (крива 3).

Коли потужність ФЕС становить 1,43 МВт, то видно, що завищена потужність станції завантажує електричну мережу, збільшує втрати електроенергії в ній і погіршує її якість. Щоб не допускати погіршення техніко-економічних показників мережі, частину потужності необхідно скерувати до сусіднього фідера, де буде

споживатися надлишок згенерованої електроенергії.

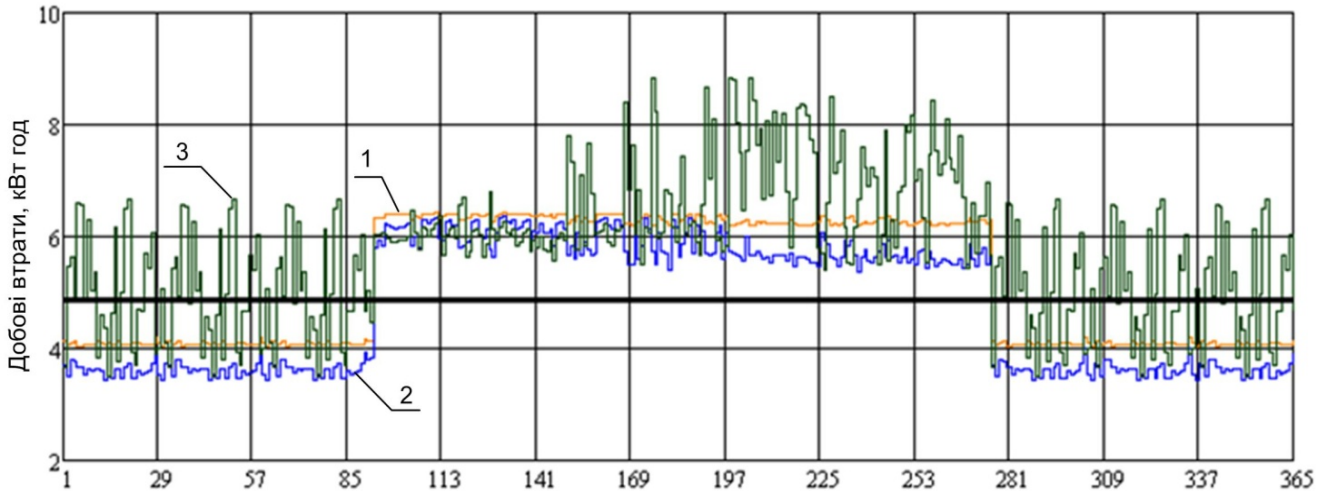


Рис. 14. Результати розрахунку добових втрат електричної енергії протягом року

Ефективним заходом підвищення якості функціонування електричних мереж з ВДЕ є узгодження графіків генерування і споживання електроенергії. Метою такого заходу є покращання техніко-економічних показників електричних мереж з ВДЕ з врахуванням максимального генерування останніми.

Залежність режиму роботи відновлюваних джерел енергії від природних умов в більшості випадків призводить до погіршення режиму роботи електричних мереж. Особливо це стосується ФЕС і ВЕС. Оскільки ФЕС і ВЕС на сьогодні можуть генерувати в мережу електроенергію без обмежень, то для балансування режиму доцільно, коли це можливо, змінювати графік споживання електроенергії споживачами.

Для узгодження графіків генерування і споживання електроенергії в електричній мережі з ВДЕ запропоновано метод, який ґрунтується на застосуванні алгоритму транспортної задачі. Результат узгодження графіків залежить від коефіцієнтів вартості зміщення потужності споживання. Оцінювання вартості зміщення потужності споживання в умовах багатозонного тарифу на електричну енергію можна здійснювати за виразом:

$$B_{ij} = P_{зм} \cdot \Pi_m (K_{Tj} - K_{Ti}) + \beta - \Delta P \cdot \Pi_m, \quad (27)$$

де  $K_{Tj}$  – коефіцієнт вартості електроенергії згідно зонного тарифу ступені графіка, з якої планується перенести потужність, у в.о.;  $K_{Ti}$  – коефіцієнт вартості електроенергії згідно зонного тарифу ступені графіка, в яку планується переносити потужність, у в.о.;  $P_{зм}$  – потужність, яку споживач має змістити для вирівнювання графіка навантаження ЕМ, кВт;  $\Pi_m$  – тариф на електроенергію по енергопостачальній компанії, грн./кВт-год;  $\beta$  – вартість технологічного зсуву виробництва, що має бути компенсована, грн;  $\Delta P$  – зменшення втрат потужності внаслідок коригування графіка навантаження споживачів, кВт.

Метод застосовано для оцінювання ефекту від узгодження графіків генерування Гальжбіївської ФЕС та навантаження. Визначено інтегральний показник якості

функціонування мережі, який для узгоджених графіків генерування та навантаження становить  $E_{я\_узгодж.} = 0,658$ .

Узгодження графіків генерування та навантаження призводить до покращення техніко-економічних та режимних параметрів роботи електричної мережі з відновлюваними джерелами енергії. Але оскільки генерування ФЕС має залежну від змінних метеопараметрів природу, то навіть у випадку узгоджених графіків генерування і споживання для балансування режиму приходиться використовувати резерв потужності. На ряду з резервом в електроенергетичній системи в роботі розглянуто використання хімічних накопичувачів. При цьому розглядались різні точки їх під'єднання: в точці під'єднання ВДЕ та на підстанції для балансування групи таких джерел.

Для доби, яка характеризується середнім рівнем хмарності, виконано імітаційне моделювання. В результаті була підібрана найменша ємність, за якої максимально точно забезпечувався прогнозований погодинний графік генерування на наступну добу. Моделювання показало більш економічну доцільність встановлення накопичувачів на групу станцій, оскільки це дозволяє знизити сумарну ємність акумуляторів. Крім цього груповий накопичувач може використовуватись під час розв'язання ряду інших задач (балансування режимів, надання системних послуг з регулювання режимних параметрів, тощо). Цим самим підвищується рентабельність вкладених коштів.

Оскільки забезпечення балансової надійності суто генеруванням ВДЕ практично неможливе, то потрібно визначити потужність резерву, який має забезпечувати енергосистема для підтримання балансу між спожитою та генерованою електроенергією в електричній мережі. В роботі розглянута можливість використання накопичувачів електричної енергії, узгодження графіків генерування ФЕС та локального електроспоживання, визначення оптимальної потужності генерування ФЕС та визначення потужності резерву, який має забезпечувати енергопостачальна компанія. Всі перелічені вище засоби по різному впливають на якість функціонування електричних станцій з ВДЕ. За запропонованим показником якості визначено, який із них в більшій мірі може підвищити якість електропостачання (рис. 15).

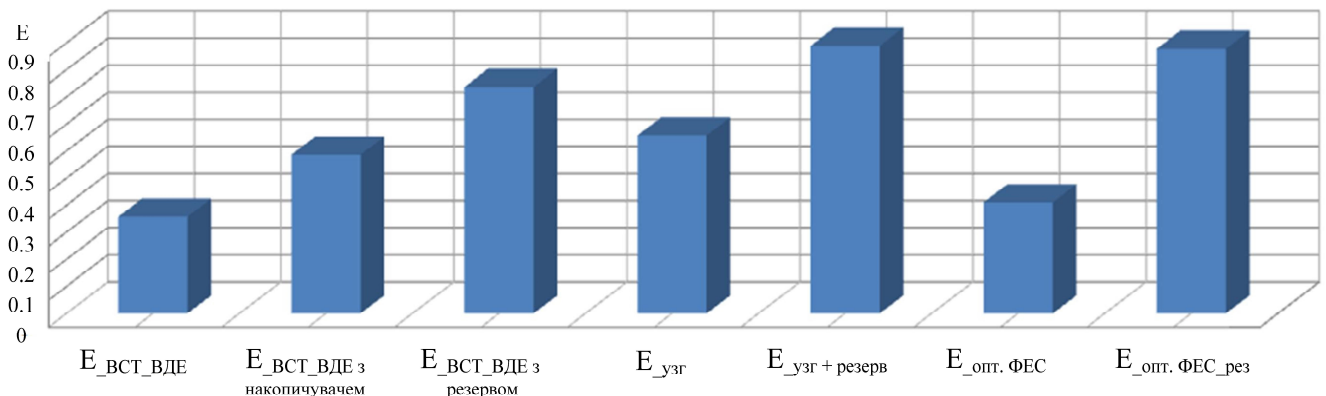


Рис. 15. Оцінювання якості функціонування з використанням різних засобів її підвищення

Серед розглянутих засобів найвищий коефіцієнт якості функціонування має узгоджений графік генерування ФЕС з електроспоживанням електричної мережі з визначеною потужністю резерву:  $E_{я\_узг.з\ резервом} = 0,989$ .

У шостому розділі показано ефективність використання розроблених методів та алгоритмів шляхом виконання натурних та обчислювальних експериментів. Розглянуто необхідність інформаційного забезпечення задачі оцінювання якості функціонування електричних мереж з відновлюваними джерелами енергії і визначені вимоги до системи моніторингу та керування. Вдосконалено метод врахування обмежень під час розв'язання проектних задач.

На даний час робота систем моніторингу та керування електричними мережами з відновлюваними джерелами енергії може організовуватись на таких джерелах інформації як автоматизовані системи комерційного обліку електричної енергії (АСКОЕ). АСКОЕ є одним з джерел даних щодо електроспоживання та генерування ВДЕ з відносно високою достовірністю. Показано, що в перспективі необхідно створювати повноформатний ОІКК з використанням Smart Grid технологій.

Виходячи з реального стану інформаційного забезпечення запропоновано архітектуру дворівневої системи моніторингу та керування. В рамках концепції Smart Grid така система реалізує такі функціональні властивості: мотивацію активної поведінки кінцевого споживача; забезпечення надійності та якості електроенергії шляхом заміни системно-орієнтованого підходу до забезпечення цих властивостей; оптимальне інтегрування розосередженого генерування і систем акумулювання електроенергії різних типів і потужності в електричній мережі; підвищення ефективності оптимізації режимів електричних мереж завдяки переходу до дистанційного моніторингу виробничих можливостей в режимі реального часу.

Аналіз існуючих можливостей інформаційного забезпечення задачі оцінювання якості функціонування електричних мереж з відновлюваними джерелами енергії показав, що найточнішим варіантом з розглянутих є розрахунок з імітацією режимів за графіками навантаження та генерування. При цьому можна забезпечити точність оцінки в межах 91%.

Аналіз узагальненої моделі розвитку електричної мережі, розробленої в розділі 4, показує, що під час використання методу штрафних функцій кількість можливих станів зменшується. Це дозволяє вирішувати задачу зі значною кількістю альтернативних заходів. Запропоновано штрафну функцією, яка залежить від значення інтегрального показника  $E_t$  на кроці  $t$ . Врахування в штрафній функції інтегрального показника якості функціонування дозволяє врахувати багатокритеріальність задачі оптимального розвитку.

Перевірка розроблених методів виконана на основі обчислювального експерименту для ряду заходів з покращення якості електропостачання та виконано аналіз їх впливу на значення інтегрального показника якості функціонування (див. рис. 16). Для врахування спотворень кривої напруг і струмів, які вносять об'єкти ВДЕ, проведено натурні експерименти на відповідних об'єктах в електричних мережах.

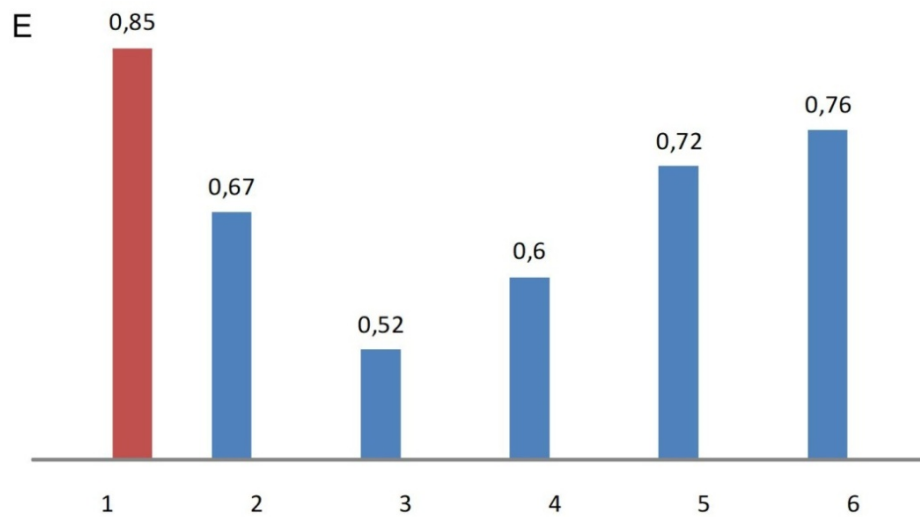


Рис. 16. Значення інтегрального показника якості функціонування для різних заходів, які розглядались в роботі

Для визначення базового режиму проведено розрахунок замкненої мережі. Значення інтегрального показника якості функціонування для такої схеми становить 0,85. Розрахунок проводився для найбільш імовірних графіків генерування і навантаження, які визначенні за статистичними даними за рік. Така конфігурації мереже розглядається як базова, яка за сучасних технічних умов існувати не може (випадок 1).

Наступним етапом проведено розрахунки і визначено оптимальні точки розмикання мережі. Для такої конфігурації якість функціонування приймає значення 0,67 (випадок 2). Пояснюється таке суттєве зниження неузгодженістю графіків генерування та споживання і суттєвою невідповідністю потоків потужності у порівнянні з кільцевою. Оскільки реалізувати схему для випадку 2 виявилось не можливо через відсутність комутаційних пристроїв у відповідних точках, то шляхом перебору визначено найкращий варіант за критерієм якості функціонування з можливих з огляду на технічні можливості (випадок 3). При цьому інтегральний показник якості функціонування зменшився до 0,52. Таке зниження інтегрального показника пояснюється зростанням невідповідності втрат базовому режиму і зниженню якості електроенергії за відхиленнями напруги у вузлах.

Наступним кроком розглянуто заміну проводів перевантажених ЛЕП та використано ФЕС як засіб впливу на режим по реактивній потужності. Оскільки такі заходи мають найбільший ефект серед заходів зменшення втрат електроенергії з переліку типових, то в результаті інтегральний показник прийняв значення 0,6 (випадок 4).

Узгодження графіків генерування та споживання запропонованим в роботі методом (випадок 5) та застосування акумулювання на ФЕС (випадок 6) дозволило підняти значення показника якості функціонування відповідно до 0,72 та 0,76.

Таким чином, показано, що системний підхід під час розбудови відновлюваних джерел енергії дозволить досягнути підвищення якості електропостачання без значної модернізації електричних мереж.

## ВИСНОВКИ

У роботі вирішено актуальну науково-прикладну проблему розвитку теорії оцінювання якості функціонування електричних мереж з відновлюваними джерелами енергії, що дозволило перейти від векторного аналізу функціональної готовності електричних мереж з відновлюваними джерелами енергії до скалярного і отримати обґрунтовані умови їх оптимального розвитку. Основні результати досліджень та рекомендації щодо їх використання можна узагальнити такими положеннями:

1. Нові економічні умови в електроенергетиці зумовлюють підвищення вимог до забезпечення якості електропостачання. Оскільки основним чинником забезпечення необхідного рівня якості електропостачання є функціональна готовність електричних мереж, тобто їхня якість функціонування, то постає задача розроблення стратегії з розвитку як електричних мереж, так і джерел електричної енергії в них.

2. Функціональну готовність електричних мереж можна оцінити за показником якості функціонування, що залежить від надійності, економічності та якості електричної енергії. Для однозначного розв'язку задачі оцінювання якості функціонування, яка є векторною, розроблено метод визначення інтегрального показника, що дозволяє звести задачу оцінювання якості функціонування електричних мереж з відновлюваними джерелами енергії до скалярної. Для цього використані результати попередніх робіт автора щодо розроблення інтегральних показників функціонування складних систем, які ґрунтуються на поєднанні теорії марковських процесів та теорії подібності, стосовно оцінювання якості функціонування електричних мереж з ВДЕ.

3. Оцінювання інтегрального показника якості функціонування електричної мережі здійснюється шляхом порівняння фактичних режимів з «ідеальним». Такий підхід дозволяє здійснювати порівняння різних варіантів систем передачі та розподілу електроенергії без визначення їх техніко-економічних показників.

4. Використання «ідеального» режиму, який відповідає економічному розподілу струму в електричній мережі за  $r$ -схемою як базового дозволяє отримати єдину методологічну базу для визначення складових інтегрального показника якості функціонування і уникнути суб'єктивності під час порівняння різних за конфігурацією та набором потужностей локальних електричних систем.

5. Застосування принципу найменшої дії в формі Гамільтона-Остроградського та теорії подібності під час визначення складових економічності та якості електричної енергії дозволяє звести оцінювання цих складових до аналізу струмів (потужностей) у вузлах приєднання споживачів та джерел енергії, що суттєво спрощує задачу в умовах недостатнього об'єму і точності вихідної інформації.

6. Запропонований інтегральний показник якості функціонування електричних мереж з відновлюваними джерелами енергії відповідає загальним вимогам, які ставляться до таких показників: відображає об'єктивну реальність; дозволяє оцінити ефективність, якість та оптимальність; забезпечує можливість фізичного та абстрактного тлумачення; відображає «крайні» стани системи з урахуванням потенційно та реально можливих; легко розкладається на часткові показники тощо.

7. Програмна реалізація розроблених алгоритмів дозволяє відносно просто



обчислювати складові інтегрального показника на ЕОМ. Визначення складових реалізується за умови обмеженого набору статистичних даних. Відсутні дані накопичуються в результаті аналізу розрахунків усталених режимів електричних мереж.

8. В роботі вдосконалено метод визначення оптимальної стратегії розвитку електричної моделі, який ґрунтується на побудові динамічної моделі, що враховує часові і просторові зв'язки. Вибір оптимальної стратегії розвитку електричних мереж виконується за інтегральним критерієм якості функціонування.

Отримані умови оптимальності, які є відношенням приростів вартості заходів, що виконуються на певному кроці, та якості функціонування в стані, до якого призвели виконані заходи. Вони дозволяють зменшити кількість станів, які розглядаються під час визначення оптимальної стратегії розвитку засобами динамічного програмування.

9. Визначення оптимальних напрямків розбудови електричних мереж не можливе без врахування технічних обмежень. Для розв'язання цієї задачі запропоновано використовувати метод штрафних функцій. Визначення штрафних функцій пропонується здійснювати за інтегральним показником якості функціонування, що дозволить врахувати багатокритеріальність задачі оптимального розвитку.

10. Державне стимулювання розбудови відновлюваних джерел енергії призводить до зростання їх частки в системному балансі електричної енергії. Тому необхідно розробляти методи та засоби, які дозволили б враховувати особливості ВДЕ під час розв'язання проектних та експлуатаційних задач в умовах підвищення вимог до якості електропостачання та покращувати інвестиційну привабливість проектів з розбудови ВДЕ.

11. Залежність режиму роботи ВДЕ від природних умов та їх конструктивні особливості не завжди дозволяють мати позитивний вплив на режими роботи електричної мережі. Особливо це стосується якості електричної енергії та її втрат, що необхідно враховувати під час розбудови ВДЕ в електричних мережах.

12. Запропоновані в роботі методи оцінювання імовірнісних характеристик ВДЕ дозволяють вдосконалити визначення встановленої потужності, яку доцільно приєднувати до певної точки електричної мережі. При цьому враховуються конфігурація мережі та особливості приєданого навантаження, яке живиться від неї. Розроблено метод узгодження графіків генерування ВДЕ та споживання, а також метод визначення потужності резерву для забезпечення необхідного рівня балансової надійності ЛЕС.

13. Застосування на фотоелектричних станціях інверторного обладнання, розширює їх можливості під час регулювання потоків реактивної потужності в електричних мережах. Виконано моделювання роботи ФЕС з коефіцієнтами потужності, відмінними від одиниці, що підтвердило доцільність і ефективність застосування таких режимів під час розв'язання задачі забезпечення якісного електропостачання.

14. Для інформаційного забезпечення задачі оцінювання якості функціонування електричних мереж з відновлюваними джерелами енергії розроблено систему моніторингу та керування, яка може бути реалізована за



обмеженого фінансування і в майбутньому трансформуватись в «розумну» мережу.

15. Працездатність та ефективність запропонованих у роботі методів і алгоритмів перевірена шляхом проведення розрахунків реальних електричних мереж. Впровадження розроблених методик визначення оптимальних стратегій їх розвитку дозволяє знизити втрати електроенергії в них на 0,3–0,6% за рахунок більш ефективного використання ВДЕ.

Результати досліджень, що стосуються питань підвищення якості функціонування електричних мереж передані для дослідно-промислової експлуатації на підприємства ТОВ «Подільський енергоконсалтинг» та ТОВ «Енергоінвест», що займаються розбудовою та експлуатацією ВДЕ в Україні. Їх впровадження дозволить підвищити прибуток від експлуатації ВДЕ на 2–5% за рахунок більш ефективного їх використання.

Алгоритми, що реалізують запропонований підхід для розроблення заходів в електричних мережах з відновлюваними джерелами енергії для підвищення якості електропостачання передані для промислової експлуатації до ПАТ «Вінницяобленерго». Їх впровадження опосередковано сприяло зменшенню технічних втрат в мережах на 2–5% за рахунок розроблення та впровадження заходів з оптимізації схем мереж.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

### *Монографії:*

1. Лежнюк П. Д., Комар В. О. Оцінка якості оптимального керування критеріальним методом: монографія. Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2006. 108 с.

2. Лежнюк П. Д., Комар В. О., Собчук Д. С. Підвищення якості електропостачання шляхом розбудови відновлюваних джерел електроенергії: монографія. Луцьк: Видавництво Луцького НТУ, 2015. 136 с.

### *Статті у наукових фахових виданнях України:*

3. Комар В. О., Пислярова А. В. Формування закону управління з врахуванням якості функціонування системи. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2006. №6. С.152 – 156.

4. Лежнюк П. Д., Комар В. О., Ілюхін М. О. Комп'ютерне моделювання процесу поширення вищих гармонік в електричних мережах. *Вісник Приазовського державного технічного університету*. 2008. № 18. Ч2. С. 47 – 50.

5. Лежнюк П. Д., Комар В. О., Кравцов К. І. Критерій оцінки якості функціонування розподільних мереж. *Електронний журнал «Наукові праці ВНТУ»*. 2008. №3. С. 1 – 7. URL: <https://praci.vntu.edu.ua/index.php/praci/article/view/72/71>.

6. Лежнюк П. Д., Лагутін В. М., Комар В. О. Кількісна оцінка якості функціонування розподільної електричної мережі за допомогою критеріальної моделі. *Електронний журнал «Наукові праці ВНТУ»*. 2008. №4. С. 1 – 7. URL: <https://praci.vntu.edu.ua/index.php/praci/article/view/91/90>.

7. Лежнюк П. Д., Комар В. О., Лесько В. О., Поліщук А. Л. Врахування якості функціонування розподільних систем під час їх реконструкції. *Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету*. 2009. Вип. 3/2009(56). ч. 1. С. 172 – 175.

8. Комар В. О., Поліщук А. Л. Критеріальне моделювання якості

функціонування розподільних мереж. *Вісник Нац. ун-ту «Львівська політехніка» Електроенергетичні та електромеханічні системи*. 2009. № 637. С. 35 – 39.

9. Назаров В. В., Комар В. О., Магас Т. Є. Оцінка якості функціонування розподільних електричних мереж з використанням критеріального моделювання. *Електронний журнал «Наукові праці ВНТУ»*. 2010. №2. С. 1 – 6. URL: <https://praci.vntu.edu.ua/index.php/praci/article/view/204/202>.

10. Комар В. О., Петрушенко Ю. В. Комплексна оцінка місць секціонування розподільної електричної мережі. *Технічна електродинаміка. тем. вип. «Проблеми сучасної електротехніки»*. Київ. 2010. ч. 1. С. 67 – 70.

11. Комар В. О., Поліщук А. Л. Узагальнена техніко-економічна оцінка ефективності реконструкції розподільних електричних мереж. *Вісник Нац. ун-ту «Львівська політехніка» Електроенергетичні та електромеханічні системи*. 2010. № 666. С. 47 – 52.

12. Лежнюк П. Д., Комар В. О. Врахування показника якості функціонування під час реконструкції розподільних електричних мереж. *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. Технічні науки*. 2010. Вип. 101. С. 6 – 8.

13. Комар В. О., Вишневський С. Я., Кузьмик О. В. Використання показника якості функціонування при оцінюванні місць розмикання розподільної електричної мережі. *Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія «Електротехніка і енергетика»*. 2011. № 11 (186). С. 182 – 185.

14. Лежнюк П. Д., Комар В. О., Лесько, О. В., Кузьмик Оптимізація режимів розподільних електричних мереж в умовах зростання частки розосередженого генерування. *Вісник харківського національного технічного університету сільського господарства ім. Петра Василенка*. 2012. №129. С.29 – 31.

15. Комар В.О., Остра Н. В., Кузьмик О. В., Гуцол С. В. Оцінка впливу розосередженого генерування на режим розподільних електричних мереж. *Наукові праці Донецького національного технічного університету*. 2013. №1(14). С. 104 – 107.

16. Лежнюк П. Д., Комар В. О., Собчук Д. С. Оцінювання впливу на якість функціонування локальної електричної системи відновлюваних джерел електроенергії. *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства ім. Петра Василенка. Вип. 141 «Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України»*. 2013. С. 8 – 10.

17. Лежнюк П. Д., Комар В. О., Собчук Д. С. Оцінювання впливу джерел відновлюваної енергії на забезпечення балансової надійності в електричній мережі. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2013. №6. С.45 – 47.

18. Лежнюк П. Д., Комар В. О., Петрушенко О. Ю. Узагальнений критерій оцінки якості функціонування автоматичної системи керування з SMART Grid. *Оптоелектронні інформаційно-енергетичні технології*. 2013. №1 (25). С. 12 – 16.

19. Лежнюк П. Д., Комар В. О., Собчук Д. С. Определение оптимальной установленной мощности возобновляемых источников энергии в распределительной сети по критерию минимума потерь активной мощности. *Наукові праці Донецького національного технічного університету Серія: «Електротехніка і енергетика»*.

2014. №1(16). С. 130 – 135.

20. Лежнюк П.Д., Комар В. О. Використання засобів кваліметрії для аналізу якості систем електропостачання з розосередженим генеруванням. *Наукові праці Донецького національного технічного університету Серія: «Електротехніка і енергетика»*. 2015. №1(17). С. 111 – 116.

21. Лежнюк П.Д., Комар В. О., Кравчук С. В. Оцінювання стабільності генерування сонячних електростанцій в задачі забезпечення балансової надійності. *Електронний журнал «Наукові праці ВНТУ»*. 2016. №2. С. 1 – 8. URL: <https://praci.vntu.edu.ua/index.php/praci/article/view/471/469>.

22. Лежнюк П. Д., Комар В. О., Кравчук С. В. Оцінювання імовірнісних характеристик генерування сонячних електростанцій в задачі інтелектуалізації локальних електричних систем. *Вісник НТУ «ХП»*, Серія: *Нові рішення в сучасних технологіях*. – Харків: НТУ «ХП». 2016. №18 (1190). С. 92 – 100. DOI:10.20998/2413-4295.2016.18.14

23. Лежнюк П. Д., Комар В. О., Кравчук С. В. Врахування нестабільності генерування енергії відновлюваними джерелами в задачі вирівнювання добового графіка електричних навантажень. *Вісник Харківського Національного Технічного Університету Сільського Господарства Імені Петра Василенка. Технічні науки. «Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України»*. – Харків: ХНТУСГ, 2016. Випуск 176. С. 15 – 18.

24. Лежнюк П. Д., Комар В. О., Кравчук С. В. Визначення оптимальної потужності резерву для забезпечення балансової надійності локальної електричної системи. *Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»*. Серія *«Нові рішення в сучасних технологіях»*. 2016. №42. С. 69 – 75.

25. Лежнюк П. Д., Комар В. О., Кравчук С. В. Узгодження графіків генерування відновлюваних джерел енергії та електричного навантаження в локальній електричній системі. *Енергетика та комп'ютерно-інтегровані технології в АПК*. 2016. №2(5). С. 30 – 37.

**Статті у наукових фахових виданнях, які входять до міжнародних наукометричних баз:**

26. Комар В.О., Ковальчук О. А., Кузьмик О. В. Вплив розосередженого генерування на якість функціонування розподільних електричних мереж. *Технічна електродинаміка*. 2012. № 2 С. 34 – 35. (Scopus)

27. Lezhnyuk P., Buslavets O., Komar V. Impact of renewable sources of energy on the level of active power losses in distribution networks. *2016 2nd International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS)*. 2016. P. 73 – 78. (Scopus)

28. Лежнюк П. Д., Комар В. О., Кравчук С. В. Узгодження графіків генерування відновлюваних джерел енергії та навантаження засобами морфометричного аналізу. *Wspolpraca Europejska European Cooperation*. – Warszawa. 2016. №9 (16). P. 26 – 35 (Index Copernicus)

29. Rubanenko L. O., Komar V. O., Petrushenko O. Y., Smolarz A., Smailova S., Imanbekova U. Determination of similarity criteria in optimization tasks by means of neuro-fuzzy modelling. *Przegląd Elektrotechniczny*. 2017. R. 93, nr 3. P. 93 – 96. DOI 10.15199/48.2017.03.22 (Scopus)

30. Petro Lezhniuk, Vyacheslav Komar, Sergiy Kravchuk, Dmytro Sobchuk Mathematical modeling of operation quality of electric grid with renewable sources of electric energy. (*MEES*), *2017 IEEE International conference on modern electrical and energy systems*. P. 324 – 327 (Scopus)

31. Lezhnyuk P., Komar V., Kravchuk S., Nanaka O. Providing fixed level of electric energy supply quality in conditions of renovation of power distribution electrical networks with renewable energy sources *Electrical and Computer Engineering (UKRCON), 2017 IEEE First Ukraine Conference* P. 379 – 383 DOI: 10.1109/UKRCON.2017.8100514 (Scopus)

**Статті в інших наукових періодичних виданнях:**

32. Лежнюк П. Д., Комар В. О., Кулик В. В. Вплив відновлюваних джерел енергії на функціонування розподільних електричних мереж. *Енергетика та електрифікація*. 2015. №1. С. 8 – 12.

33. Кулик В. В., Комар В. О., Бурикін О. Б. Техніко-економічне обґрунтування реконструкції електричних мереж з переведенням напруги 10 кВ на напругу 20 кВ на прикладі Південного РЕМ ПАТ «Одесаобленерго». *Енергетика та електрифікація*. 2016. №4-5. С. 81 – 86.

**Статті в науковому періодичному виданні іншої держави:**

34. Лежнюк П.Д., Комар В. О. Математическое моделирование показателя качества функционирования электрической сети при оптимизации ее схемы. *Труды Нижнегородского государственного технического университета им. П.Е. Алексеева*. 2012. № 3(96). С. 202 – 208.

35. Lezhnyuk P.D., Komar V. O., Petrushenko O. Yu. Criterial modeling of Markov processes in the problems of automatic control systems functioning quality evaluation. *Nauka i Studia*. 2014. №3(113). P. 42 – 48.

36. Lezhniuk P. D., Komar V. O., Sobchuk D. S. Method for Determination of Optimal Installed Capacity of Renewable Sources of Energy by the Criterion of Minimum Losses of Active Power in Distribution System. *Energy and Power Engineering, (Scientific Research Publishing Inc.)* 2014. №6. P. 37 – 46.

37. Lezhnyuk P. D., Komar V. O., Kravchuk S.V., Ngoma Jean-Pierre. Assessment Stability Generation of Solar Power Plants in the Problems of Providing Balance Reliability. *Sciences of Europe (Praha, Czech Republic)* . 2016. Vol. 4, №9. P. 90 – 96.

38. Lezhniuk Petro D., Komar Vyacheslav O., Sobchuk Dmytro S., Teptia Vira V., Gryniewicz-Jaworska Michalina. Integral index of operation quality for evaluation of impact of distributive generation sources on electric network modes. *Advances in Science and Technology Research Journal*. June 2017. Volume 11. Issue 2. P. 65 – 71 DOI: 10.12913/22998624/70760

**Публікації в матеріалах міжнародних конференцій:**

39. Лежнюк П. Д., Комар В. О., Поліщук А. Л. Оцінка якості функціонування розподільної електричної мережі за критеріальною моделлю. *Матеріали міжнародної науково-технічної інтернет-конференції. "Новейшие технологии в электроэнергетике"*. (Харків, 25-27 березня 2009). Харків. 2009. С.51 – 52.

40. Комар В. О., Кузьмик О. В. Дослідження впливу відновлюваних джерел електричної енергії на режим роботи розподільних електричних мереж.

*V Міжнародна науково-технічна конференція "Підвищення рівня ефективності енергоспоживання в електротехнічних пристроях і системах".* (Луцьк, 24-26 червня 2014). Луцьк–Шацікі озера. 2014. С. 116 – 117.

41. Лежнюк П. Д., Ковальчук О. А., Комар В. О., Кравчук С. В. Оцінювання балансової надійності в мережах з сонячними електричними станціями шляхом аналізу імовірнісних характеристик генерування. *Матеріали XVII міжнародної науково-практичної конференції «Відновлювана енергетика та енергоефективність у XXI столітті».* (Київ, 29-30 вересня 2016). Київ. 2016. С. 300 – 304.

42. Комар В. О., Лесько В. О. Балансова надійність електричних систем і вплив на неї відновлюваних джерел енергії. *Збірник доповідей. Міжнародна науково-технічна конференція «Екологічна безпека та відновлювані джерела енергії».* (Вінниця, 24-25 травня 2017). Вінниця. 2017. С. 98 – 101.

43. Лежнюк П. Д., Ковальчук О. А., Комар В. О., Кравчук С. В. Математичне моделювання регулювання реактивної потужності фотоелектричними станціями. *Матеріали XIX міжнародної науково-технічна конференція «Відновлювана енергетика на енергоефективність XXI століття».* (Київ, 26-28 вересня 2018). Київ. 2018. С. 273 – 277.

44. Лежнюк П. Д. Комар В. О., Кравчук С. В. Фотоелектричні станції як елемент енергоефективного електропостачання. *Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції «Цілі сталого розвитку третього тисячоліття: виклики для університетів наук про життя».* (Київ, 23-25 травня 2018). Київ. 2018. С. 17 – 19.

***Охоронні документи щодо захисту авторського права на розроблені програмні засоби та корисні моделі:***

45. Комп'ютерна програма «Програмний комплекс аналізу чутливості та оптимізації втрат потужності в електричних мережах енергосистем» («АЧП») / [П. Д. Лежнюк, В. В. Кулик, К. І. Кравцов, О. Б. Бурикін, В. О. Комар] // Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір №35590. Державний департамент інтелектуальної власності МОН України, Відділ з питань авторського права і суміжних прав. – 2010.

46. Комп'ютерна програма «Програмний комплекс розрахунку втрат потужності і електроенергії в розподільних електричних мережах 110(35)-10(6)-0,4 кВ та розробки заходів щодо їх зменшення – Втрати» («Втрати») / [П. Д. Лежнюк, В. В. Кулик, К. І. Кравцов, О. Б. Бурикін, В. О. Комар] // Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір №34106. Державний департамент інтелектуальної власності МОН України, Відділ з питань авторського права і суміжних прав. – 2010.

47. Комп'ютерна програма «Морфометрія графіка електричних навантажень» / [Лежнюк П.Д., Комар В.О., Кравчук С.В.] // Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір №69917. Державна служба інтелектуальної власності України. 19.01.2017

48. Спосіб оптимального керування режимами розподільних електричних мереж з розосередженим генеруванням: пат. 111395 Україна: МПК (2006.01) Н 02 J 3/24, G 01 R 31/00; № u 201604575; заявл. 25.04.2016 ; опубл. 10.11.2016, Бюл. № 21 / Лежнюк П. Д., Рубаненко О. Є., Сікорська О. В., Комар В. О.; заявник та патентовласник Вінницький національний технічний університет.

## АНОТАЦІЯ

**Комар В. О. Оцінювання якості функціонування електричних мереж з відновлюваними джерелами енергії. – На правах рукопису.**

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.14.02 – електричні станції, мережі і системи. – Вінницький національний технічний університет, Вінниця, 2019. Національний університет «Львівська політехніка», Львів, 2019.

Дисертація присвячена вирішенню науково-технічної проблеми, яка полягає у розробленні методів і засобів для оцінювання якості функціонування електричних мереж з відновлюваними джерелами енергії.

Якість функціонування електричних мереж характеризується якістю електричної енергії, надійністю електропостачання, його економічністю, тощо. Користуючись результатами досліджень, виконаними автором у попередніх своїх роботах, запропоновано визначати інтегральний показник якості функціонування електричних мереж за моделлю, яка отримана на поєднанні теорій марковських процесів та подібності, що дозволяє перейти від векторної оцінки до скалярної.

Для врахування в інтегральному показнику якості електричної енергії та рівня її втрат запропоновано визначати імовірність відповідності фактичного режиму «ідеальному». «Ідеальний» режим визначається, виходячи з принципу найменшої дії і відповідає заступній схемі мережі, сформованій за  $r$ -схемою. Такий підхід дозволяє аналіз режимних параметрів звести до аналізу струмів у вузлах споживання та генерування.

Оскільки за базис прийнято «ідеальну» мережу, то можна виконувати порівняння електричних мереж різних за конфігурацією і набором споживаних та генеруючих потужностей без виконання техніко-економічних розрахунків.

Показано, що запропонований в роботі підхід визначення інтегрального показника якості функціонування дозволяє враховувати індивідуальні особливості споживачів і під час розв'язання проектних задач надавати пріоритет певним складовим, які характеризують якість функціонування електричної мережі.

Для розв'язання задачі розвитку електричних мереж з дискретними змінними запропоновано використовувати методи на базі динамічного програмування. Однак для цього необхідно розробити формалізовані процедури оптимізації з використанням принципу оптимальності динамічного програмування. Для цього були отримані умови оптимальності, за якими можна вибирати оптимальну стратегію розвитку з множини можливих. Відповідно до цих умов оптимальною є стратегія, для різних можливих станів якої, рівні відношення приростів витрат до приростів інтегрального показника якості функціонування.

Врахування технічних обмежень, під час розв'язання проектних задач, виконується методом штрафних функцій. Визначення штрафних функцій запропоновано здійснювати за інтегральним показником якості функціонування, що дозволить врахувати багатокритеріальність задачі оптимального розвитку.

Виконано дослідження можливості застосування відновлюваних джерел енергії для впливу на перетікання реактивної потужності в електричній мережі. Проведене моделювання підтвердило доцільність і ефективність застосування ВДЕ як засобу

впливу на баланс реактивної потужності.

Для уникнення негативних наслідків від впровадження необґрунтовано потужних джерел в електричних мережах вдосконалено метод визначення оптимальної встановленої потужності джерела. Розроблений метод, на основі інформації про об'єм, графік споживання і доступні точки приєднання об'єктів генерування, дозволяє визначити встановлену потужність ВДЕ, яка забезпечить підвищення якості функціонування мережі.

Вивчення досвіду країн-лідерів у впровадженні відновлюваних джерел енергії показав, що необхідно впроваджувати заходи для корегування графіків споживання. Розроблені в світі механізми дозволяють реалізувати керування споживанням (demand response). В роботі розроблено метод визначення споживачів, зміна графіку навантаження яких буде мати найбільший ефект під час забезпечення необхідного рівня якості функціонування електричних мереж. Розроблений алгоритм реалізації методу, який ґрунтується на транспортній задачі, і дозволяє врахувати економічну складову процесу корегування графіків споживання.

Розроблено метод визначення необхідного резерву в електроенергетичній системі для забезпечення достатнього рівня балансової надійності. Виконано аналіз джерел забезпечення резерву за різних варіантів функціонування відновлюваних джерел енергії в локальній електричній системі.

Розглянуто проблему інформаційного забезпечення задачі оцінювання якості функціонування електричних мереж з ВДЕ. Проведений аналіз інформаційного забезпечення в розподільних електричних мережах показав, що найкращим джерелом інформації є автоматизовані системи комерційного обліку електроенергії (АСКОЕ). Однак АСКОЕ охоплює лише незначну частину вузлів споживання. Інші варіанти отримання інформації є розрахунок за характерним режимом (середніх навантажень) або імітацією режимів за типовими графіками, при цьому останній варіант може забезпечити розв'язання поставленої задачі з достатньою точністю.

Запропоновано архітектуру дворівневої системи моніторингу та керування, яка в рамках концепції Smart Grid реалізує активну поведінку кінцевого споживача та оптимальне інтегрування розосередженого генерування і систем акумулювання електроенергії різних типів і потужності в електричній мережі, що призведе до зростання надійності та якості електроенергії.

Здійснено апробацію розроблених моделей та методів для оцінювання якості функціонування електричних мереж з відновлюваними джерелами енергії та показано доцільність їх використання. Для цього проведено ряд натурних експериментів для визначення рівня спотворень синусоїди напруги та струму різними об'єктами відновлюваної енергетики.

**Ключові слова:** електричні мережі, відновлювані джерела енергії, якість функціонування, структурна надійність, балансова надійність, якість електричної енергії, втрати електричної енергії, коефіцієнти струморозподілу, «ідеальний» режим.

**ABSTRACT****Komar V.O. Quality operation estimation of the electric networks with renewable energy sources. – On the rights of the manuscript.**

Dissertation for the Doctor of Technical Sciences degree in specialty 05.14.02 – electric power stations, networks and systems. – Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia. National University "Lviv Polytechnic", Lviv, 2018.

The dissertation devoted by scientific and technical problem solution, which consists in developing methods and means for assessing the quality of electric networks functioning with renewable energy sources.

The quality functioning of electric networks is characterized by the quality of electric energy, electricity supply reliability, economic efficiency, and other. Using research results carried out by the author in his previous papers, it is proposed to determine the integral index of electric networks quality functioning according to the model obtained by a combination of Markovs theories processes and similarity, which allows us to move from vector to scalar.

In order to take into account in the integral index of electric energy quality and level of electricity losses it is proposed to determine the probability of correspondence the actual regime to the "ideal". "Ideal" regime is determined by the basis principle of least action and corresponds to the network which formed by r-scheme. This approach can change allows regime parameters analysis to the nodes currents analysis of consumption and generation.

Since the "ideal" network is adopted for the basis, it is possible to perform a electrical networks comparison of different configurations and a set of consumed and generating capacities without performing technical and economic calculations.

It is shown that the problem of electric networks development with discrete variables can be solved by methods based on dynamic programming. However, for this purpose, it is necessary to develop formalized optimization procedures using the dynamic programming optimality principle. For this purpose, optimal conditions have been obtained, by which one can choose the optimal development strategy from the set of possible ones. In accordance with these conditions, the strategy is optimal, for the various possible states, the ratio of incremental costs to increments of the integral quality functioning indicator.

To avoid the negative consequences of the introduction of unreasonably powerful sources in electrical networks, the method of optimal installed power of the source has been improved. The developed method, based on information on the volume, consumption graph and available points of generating objects connection, allows you to determine the installed capacity of RES, which will ensure the improvement of the network operation quality.

Using leading countries the experience in the renewable energy sources implementation shown that measures are needed to adjust consumption curves. The mechanisms developed in the world allow to implement demand management. The method of determination consumers which load graph change will have the greatest effect in providing the necessary level of electric networks quality functioning. An algorithm for implementing a method based on a transport task is developed and allows for the economic component of adjusting consumption graph process be taken into account.



The problem of information provision in the electric networks with RES quality functioning is considered. An analysis of information provision in distribution electrical networks has shown that automated systems of commercial electricity accounting (ASCEA) are the best sources of information. However, ASCEA covers only a small part of the consumption nodes. Other options for obtaining information is the calculation of the typical mode (average load) or simulation of modes according to typical graphs, with the latter option can provide a solution to the task with sufficient accuracy.

The testing of developed models and methods for assessing the electric networks with renewable energy sources functioning quality has been tested and the feasibility of their use has been demonstrated.

Key words: electrical networks, renewable energy sources, functioning quality, structural reliability, balance reliability, quality of electric energy, losses of electric energy, current distribution coefficients, "ideal" mode.

## АННОТАЦИЯ

**Комар В. А. Оценка качества функционирования электрических сетей с возобновляемыми источниками энергии. – На правах рукописи.**

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.14.02 – электрические станции, сети и системы. – Винницкий национальный технический университет, Винница, 2018. Национальный университет «Львовская политехника», Львов, 2018.

Диссертация посвящена решению научно-технической проблемы, которая заключается в разработке методов и средств для оценки качества функционирования электрических сетей с возобновляемыми источниками энергии.

Качество функционирования электрических сетей характеризуется качеством электрической энергии, надежности электроснабжения, его экономичностью и тому подобное. Пользуясь результатами исследований, выполненными автором в предыдущих своих работах, предложено определять интегральный показатель качества функционирования электрических сетей по модели, полученной на сочетании теории марковских процессов и подобия, что позволяет перейти от векторной оценки к скалярной.

Для учета в интегральном показателе качества электрической энергии и уровня потерь предложено определять вероятность соответствия фактического режима «идеальному». «Идеальный» режим определяется исходя из принципа наименьшего действия и отвечает сети построенной по  $r$ -схеме. Такой подход позволяет анализ режимных параметров свести к анализу токов в узлах потребления и генерации.

Поскольку базисом принято «идеальную» сеть, то можно выполнять сравнения электрических сетей различных по конфигурации и набору потребляемых и генерирующих мощностей без выполнения технико-экономических расчетов.

Показано, что задача развития электрических сетей с дискретными переменными может быть решена методами на базе динамического программирования. Однако для этого необходимо разработать формализованные процедуры оптимизации с использованием принципа оптимальности динамического

программирования. Для этого были получены условия оптимальности, по которым можно выбрать оптимальную стратегию развития из множества возможных. Согласно этим условиям оптимальной является стратегия, для различных возможных состояний которой, равны отношение приростов расходов к приростам интегрального показателя качества функционирования.

Во избежание негативных последствий от внедрения необоснованно мощных источников в электрических сетях усовершенствован метод определения оптимальной установленной мощности источника. Разработанный метод, на основе информации об объеме, графике потребления и доступных точках присоединения объектов генерации, позволяет определить установленную мощность ВИЭ, которая обеспечит повышение качества функционирования сети.

Изучение опыта стран-лидеров во внедрении возобновляемых источников энергии показал, что необходимо внедрять меры для корректировки графиков потребления. Разработанные в мире механизмы позволяют реализовать управление потреблением (demand response). В работе разработан метод определения потребителей, изменение графика нагрузки которых будет иметь наибольший эффект при обеспечении необходимого уровня качества функционирования электрических сетей. Разработанный алгоритм реализации метода, основанного на транспортной задаче, и позволяет учесть экономическую составляющую процесса корректировки графиков потребления.

Рассмотрена проблема информационного обеспечения задачи оценки качества функционирования электрических сетей с ВИЭ. Проведенный анализ информационного обеспечения в распределительных электрических сетях показал, что лучшим источником информации являются автоматизированные системы коммерческого учета электроэнергии (АСКУЭ). Однако АСКУЭ охватывает лишь незначительную часть узлов потребления. Другими вариантами получения информации является расчет по характерному режимом (средних нагрузок) или имитацией режимов по типовым графикам, при этом последний вариант может обеспечить решение поставленной задачи с достаточной точностью.

Осуществлена апробация разработанных моделей и методов для оценки качества функционирования электрических сетей с возобновляемыми источниками энергии и показана целесообразность их использования.

**Ключевые слова:** электрические сети, возобновляемые источники энергии, качество функционирования, структурная надежность, балансовая надежность, качество электрической энергии, потери электрической энергии, коэффициенты токораспределения, «идеальный» режим.