

Міністерство освіти і науки України
Вінницький національний технічний університет

КРАВЧУК СЕРГІЙ ВАСИЛЬОВИЧ

УДК 621.316.1:621.311.29

**ОПТИМІЗАЦІЯ ПОТУЖНОСТЕЙ ГЕНЕРУВАННЯ
ФОТОВОЛЬТАЇЧНИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ В ЗАДАЧАХ
ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ БАЛАНСОВОЇ НАДІЙНОСТІ ЛОКАЛЬНИХ
ЕЛЕКТРИЧНИХ СИСТЕМ**

Спеціальність 05.14.02 – Електричні станції, мережі і системи

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Вінниця – 2017

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана у Вінницькому національному технічному університеті,
Міністерство освіти і науки України.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
Лежнюк Петро Дем'янович,
Вінницький національний технічний університет,
завідувач кафедри електричних станцій та систем.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, доцент
Попов Володимир Андрійович,
Національний технічний університет України «Київський
політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»,
професор кафедри електропостачання;

кандидат технічних наук, старший науковий співробітник
Стелюк Антон Олегович,
Інститут електродинаміки НАН України,
старший науковий співробітник відділу моделювання
електроенергетичних об'єктів і систем.

Захист відбудеться “08” грудня 2017 р. о 10⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради К 05.052.05 у Вінницькому національному технічному університеті за адресою: 21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95, ГНК, ауд. 210.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Вінницького національного технічного університету за адресою: 21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95.

Автореферат розісланий “03” листопада 2017 р.

Учений секретар
спеціалізованої вченої ради

О. Б. Бурикін

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Інтенсивне впровадження відновлюваних джерел енергії в електроенергетичну систему України ставить нові задачі перед фахівцями галузі. В основному вони зумовлені непристосованістю розподільних електричних мереж до електричних станцій, які використовують відновлювані джерела енергії, з нестабільним генеруванням та відсутністю достатнього рівня автоматизації мереж.

Розміщення відновлюваних джерел електроенергії (ВДЕ) поряд зі споживачами потенційно повинно призводити до розвантаження електричних мереж, підвищення якості і надійності електропостачання. Однак, нестабільність генерування ВДЕ, зумовлена природними особливостями місця їх встановлення, завищена потужність приєднаного джерела, призводять до зниження ефективності функціонування електричної мережі і зниження якості послуг з електропостачання кінцевого споживача. Особливо це стосується фотовольтаїчних електростанцій (ФЕС), частка яких в балансі Об'єднаної електричної системи України зростає з кожним роком.

Наявність в розподільній електричній мережі джерел енергії дозволяє характеризувати їх як локальну електричну систему (ЛЕС), від надійної і економічної роботи якої залежить не лише рівень послуг з електропостачання, а й стабільна робота електроенергетичної системи (ЕЕС). При цьому, важливим є узгодження графіків навантаження і генерування в ЛЕС таким чином, щоб шляхом балансування потужності в ЛЕС мінімізувати їх вплив на основні центри живлення ЕЕС. Особливо тоді, коли в точках приєднання ЛЕС до ЕЕС необхідно витримувати заданий графік споживання (генерування) електроенергії. За таких умов необхідно мінімізувати відхилення від централізовано заданого графіка сукупного генерування ВДЕ. При цьому повинна бути забезпечена стійкість ЛЕС як в режимі мінімального навантаження, так і в режимі максимального навантаження.

Оскільки частка фотовольтаїчних електростанцій серед ВДЕ є суттєвою, а генерування їх нестабільне через залежність від природних умов, то актуальним є дослідження їх впливу на режими локальної електричної системи. Необхідно розробляти методи і засоби оптимального використання ФЕС в електричних мережах таким чином, щоб узгоджувалися інтереси компаній по генеруванню і розподілу електроенергії та забезпечувалась якість електропостачання споживачів електроенергії.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертація виконана в плані наукових досліджень, які проводились кафедрою електричних станцій та систем ВНТУ за держбюджетною та госпдоговірною темами: «Інтелектуалізація електроенергетичних систем з відновлювальними джерелами енергії на основі принципу Гамільтона-Остроградського» (№ держреєстрації 0115U001120) та «Програмно-апаратний комплекс прогнозування режимів функціонування фотовольтаїчних електричних станцій» (№ договору 2162) відповідно. Автор брав участь у виконанні вищевказаних робіт як виконавець.

Метою роботи є підвищення балансової надійності локальних електричних систем та покращення їх якості функціонування шляхом визначення оптимальних потужностей генерування фотовольтаїчних електростанцій.

Відповідно до вказаної мети в роботі вирішуються такі **основні задачі**:

- дослідження взаємовпливу режимів ФЕС та споживачів електроенергії на основі аналізу графіків їх функціонування;
- аналіз методів оцінювання балансової надійності локальних електричних систем в умовах розбудови розосередженого генерування;
- розроблення методу оцінювання стабільності генерування відновлювальних джерел енергії в задачах оцінювання балансової надійності;
- вдосконалення інтегрального показника якості функціонування локальних електричних систем для оцінювання рівня якості електропостачання споживачів;
- розроблення методу визначення оптимальної встановленої потужності відновлювальних джерел енергії на підставі аналізу якості функціонування локальної електричної системи;
- розроблення методу узгодження графіків генерування ФЕС та навантаження в локальній електричній системі;
- розроблення методу визначення оптимальної потужності резерву для забезпечення балансової надійності локальної електричної системи;
- виконання алгоритмічної та програмної реалізації розроблених методів та перевірка їх ефективності.

Об'єктом дослідження роботи є нормальні режими розподільних електричних мереж з фотовольтаїчними електростанціями.

Предметом дослідження є методи та засоби підвищення балансової надійності локальних електричних систем.

Методи дослідження. Для розроблення методів визначення оптимальної встановленої потужності та добових графіків генерування ВДЕ в локальній електричній системі використані методи математичного моделювання та чисельні методи. Статистичні методи оброблення інформації використано для аналізу результатів натурного експерименту. Методи лінійного програмування застосовано для формування алгоритмів пошуку оптимальних розв'язків поставлених задач. Усталені режими моделюються та аналізуються з використанням методу вузлових напруг, матричної алгебри, теорії графів. Для розроблення алгоритмів і програм аналізу графіків генерування ФЕС та їх впливу на режими роботи ЛЕС використовувалися декомпозиція та об'єктно-орієнтований аналіз.

Наукова новизна одержаних результатів полягає у тому, що:

- вперше запропоновано метод визначення оптимальної потужності резерву для фотовольтаїчних електростанцій в локальній електричній системі за критерієм мінімуму приведених витрат енергопостачальної компанії, що дозволяє компенсувати нестабільність процесу генерування ФЕС і підвищити балансову надійність;
- вперше запропоновано метод узгодження графіків електричних

навантажень в локальній електричній системі і генерування фотовольтаїчних електростанцій в ній, що ґрунтується на застосуванні алгоритму транспортної задачі і дозволяє підвищити енергоефективність ЛЕС за рахунок зменшення втрат електроенергії в мережі, покращення якості напруги та підвищення надійності електропостачання.

– на основі аналізу ймовірнісних характеристик графіків генерування фотовольтаїчних електростанцій, вдосконалено метод визначення коефіцієнта стабільності їх генерування завдяки застосуванню апарату Гаусових сумішей, що дозволяє обґрунтувати ємність накопичувача електроенергії як резерву потужності в локальній електричній системі;

– розвинуто метод оцінювання якості функціонування локальної електричної системи шляхом визначення вагових коефіцієнтів для складових інтегрального показника якості, що дозволяє визначити готовність локальної електричної системи до забезпечення надійного і якісного електропостачання споживачів.

Практичне значення одержаних результатів. Практична цінність роботи полягає в тому, що на підставі результатів виконаних досліджень розв'язана задача підвищення балансової надійності ЛЕС, що полягає у визначенні оптимальної потужності резерву від централізованих джерел живлення. Така потужність визначена за критерієм мінімуму приведених витрат енергопостачальної компанії.

За результатами проведених теоретичних досліджень розроблено програму, що дозволяє на основі аналізу нерівномірності сумарного добового графіка локальної електричної системи визначити необхідну міру зміщення графіка споживання протягом доби за фінансового стимулювання енергопостачальною компанією для забезпечення максимального вирівнювання сумарного добового графіка електроспоживання ЛЕС.

Розроблені у роботі алгоритми та програми визначення ємності накопичувача, що рекомендується для встановлення на фотовольтаїчній електростанції, передано для дослідної експлуатації до ТОВ «Подільський енергоконсалтинг» (довідка про впровадження від 19.06.2017 р.).

На основі вдосконаленого показника якості функціонування ЛЕС запропоновано метод визначення оптимальної встановленої потужності ФЕС, яка забезпечує зниження втрат електроенергії, підвищення якості напруги і надійності електропостачання. Використовуючи даний метод, можна досягти зменшення втрат в окремих електричних мережах на 2–5%, а також забезпечити дотримання нормативних відхилень напруги під час роботи ФЕС. Запропонований підхід, реалізований програмними засобами, передано для дослідної експлуатації в ТОВ «Енергоінвест» (довідка про впровадження від 15.06.2017р).

Результати дисертаційного дослідження впроваджено в навчальному процесі Вінницького національного технічного університету (довідка про впровадження від 14.06.2017 р.).

Особистий внесок здобувача. Всі наукові положення, які є основним змістом дисертаційної роботи, розроблено та обґрунтовано здобувачем

особисто. У роботах, що опубліковано у співавторстві, внесок автора такий. В [1] запропоновано метод визначення показника стабільності генерування фотовольтаїчних електростанцій для оцінювання впливу останніх на балансову надійність електричних мереж. В [2, 13] запропоновано модель для оцінювання імовірнісних характеристик зміни потужності генерування ФЕС та навантаження ЛЕС. В [3] запропоновано алгоритм використання методу вирівнювання графіку навантаження локальних електричних систем з ФЕС. В [4] запропоновано метод визначення оптимальної, за критерієм мінімуму приведених витрат енергопостачальної компанії, потужності резерву для локальних електричних систем з високим ступенем впровадження відновлювальних джерел електроенергії. В [5,15] запропоновано алгоритм методу узгодження графіків генерування ФЕС та навантаження локальної електричної системи, що враховує нестабільність генерування ФЕС. В [6,14] запропоновано метод визначення оптимальних, за критерієм мінімуму втрат потужності, місць встановлення ВДЕ і їх потужностей. В [7] запропоновано алгоритм оптимізації нормальних режимів електроенергетичних систем за різних критеріїв оптимальності. В [8] запропоновано математичну модель електричної мережі, що враховує нестабільну природу генерування потужності відновлювальними джерелами енергії, зокрема фотовольтаїчними електростанціями та малими гідроелектростанціями. В [9] розроблено алгоритм узгодження графіків генерування фотовольтаїчних електростанцій та електричного навантаження споживачів локальних електричних систем. В [10,12] здійснено комплексне оцінювання впливу генерування фотовольтаїчних електричних станцій на балансову надійність локальної електричної системи. В [11] проведено аналіз виконаних тестових розрахунків з використанням розробленого програмного продукту.

Результати теоретичних досліджень, що викладені у [1 – 15], були отримані у Вінницькому національному технічному університеті.

Апробація результатів дисертації. Основні положення роботи та її результати доповідались, обговорювались та були схвалені на таких науково-технічних конференціях та семінарах:

- XII, XIII міжнародні конференції «Контроль і управління в складних системах (м. Вінниця, 2014, 2016 рр.);
- V, VI міжнародні науково-технічні конференції «Підвищення рівня ефективності енергоспоживання в електротехнічних пристроях і системах». (м. Луцьк, 2014, 2016 рр.);
- науково-технічний семінар “Електричні мережі енергосистем з нетрадиційними і відновлювальними джерелами енергії” НАН України «Наукові основи електроенергетики» (м. Вінниця 2015, 2016 рр.);
- III міжнародна науково-технічна конференція «Оптимальне керування електроустановками ОКЕУ-2015» (м. Вінниця, 2015 р.);
- XVII міжнародна науково-практична конференція Відновлювальна енергетика та енергоефективність у XXI столітті (м. Київ, 2016 р.);
- міжнародна науково-практична конференція «Розподільчі мережі 0,4-35 кВ як складова частина локальних електроенергетичних систем майбутнього» (м. Хмельницький, 2016 р.);
- V науково-практична конференція «Сучасні методи аналізу ustalених режимів електричних мереж та стійкості електроенергетичних

систем. Новітні досягнення у проведенні тренажерної підготовки оперативно-диспетчерського персоналу» (с.м.т. Славсько, 2017 р.); – IEEE First Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON) (Kyiv, 2017); – V міжнародна конференція «Інтелектуальні енергетичні системи – ESS'17» (м. Київ, 2017 р.).

Публікації. За матеріалами дисертаційної роботи опубліковано 15 робіт, з яких 7 статей у наукових фахових виданнях, 4 статті у міжнародних періодичних виданнях, 1 з них проіндексована в базі даних Scopus, 3 публікацій у збірниках матеріалів міжнародних технічних конференцій, 1 свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір.

Структура й обсяг роботи. Дисертаційна робота складається з вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел (128 найменувань) і 6 додатків. Основний зміст викладено на 157 сторінках друкованого тексту, містить 56 рисунків, 12 таблиць. Загальний обсяг роботи – 187 сторінок.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність роботи, сформульовано мету і задачі. Наведено наукову новизну і практичну цінність отриманих результатів, а також подано відомості щодо апробації роботи, особистого внеску здобувача та публікацій. Зазначено зв'язок роботи з науковими програмами та темами.

У **першому розділі** проведено аналіз умов функціонування електричних мереж з відновлювальними джерелами електроенергії, показано вплив нестабільності генерування відновлювальних джерел енергії на втрати електроенергії в електричних мережах, на якість електроенергії в них, а також на надійність електропостачання, обґрунтовано доцільність використання інтегрального показника якості функціонування електричних мереж з ВДЕ. З метою узгодження графіків генерування ВДЕ та навантаження проаналізовано показники оцінювання їх нерівномірності. Також в розділі уточнено задачі наукового дослідження.

Україна досить інтенсивно нарощує об'єми електричної енергії, що виробляється на базі ВДЕ загалом та на фотовольтаїчних електричних станціях (ФЕС) зокрема (див. рис. 1). Переважна частина ФЕС під'єднуються до розподільних електричних мереж. Це зумовлено, з одного боку, технічними особливостями, а з іншого, фінансовими чинниками. Під'єднання фотовольтаїчних електростанцій до розподільних мереж призводить до того, що ці мережі набувають властивостей електричної системи зі всіма перевагами і недоліками. В такому випадку розподільні електричні мережі з джерелами розосередженого генерування логічно називати локальними електричними системами (ЛЕС).

Розбудова ВДЕ, зокрема ФЕС, відбувається нерівномірно в межах України. Так, за даними Національної комісії, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг (НКРЕКП), на початок 2017 року майже чверть потужності ФЕС під'єднано до мереж ПАТ «Вінницяобленерго» (див.рис.1).



Рисунок 1 – Приріст установленної потужності ФЕС за останні роки (МВт): по ОЕС України та ПАТ «Вінницяобленерго»

Очевидним є і те, що по районних мережах розподіл ВДЕ також нерівномірний. Це призводить до появи ЛЕС зі значною потужністю ВДЕ. Відсоток навантаження, яке покривається за рахунок ВДЕ, досягає в ряді районів 20%. Враховуючи особливості таких джерел енергії, необхідно розробити методи і засоби для визначення їх впливу на надійність електропостачання, зокрема балансову, та забезпечення економічності передавання електроенергії і її якості. Вирішення такої задачі ускладнюється і тим, що генерування таких джерел енергії сезонно змінюється, а отже залежить від метеопараметрів та зміни тривалості світлового дня, тому є нестабільною.

Виходячи з цього, виникає необхідність оцінювання такої нестабільності. Її врахування доцільно здійснювати на основі визначення основних імовірнісних характеристик процесу генерування (математичне очікування, середньоквадратичне відхилення). Через нестабільність генерування ФЕС самостійно забезпечити баланс потужності в ЛЕС не можливо. Тому для забезпечення балансової надійності виникає задача визначення необхідної потужності резерву, який має забезпечувати централізоване джерело живлення.

Показано, що генерування ФЕС впливає на режимні параметри роботи електричних мереж, зокрема на втрати активної потужності та зміну рівнів напруги у вузлах електричної мережі (ЕМ). Оцінювання такого впливу доцільно здійснювати комплексно та з огляду на можливість забезпечення балансової надійності в ЛЕС, визначаючи оптимальну встановлену потужність ФЕС. Оскільки ФЕС приєднані до ЕМ безпосередньо зі сторони споживача, то виникає завдання покращення їх економічності шляхом узгодження графіків генерування ФЕС та навантаження. Для обґрунтування узгодження графіків проаналізовано показники, що характеризують нерівномірність графіка електричних навантажень (ГЕН). Серед інших доцільно виділити морфометричний підхід в оцінюванні нерівномірності ГЕН.

Для визначення техніко-економічного ефекту від впровадження ВДЕ та обґрунтування доцільності розбудови останніх в ЛЕС необхідно вдосконалити вже існуючий інтегральний показник, що дасть можливість оцінювати

функціональну готовність ЛЕС до забезпечення якісного, економічного та надійного електропостачання споживачів.

У **другому розділі** розроблено математичні моделі для визначення впливу відновлювальних джерел енергії, зокрема ФЕС, на якість функціонування локальних електричних систем. За рахунок поєднання теорії марковських процесів та критеріального методу в моделі якості функціонування локальних електричних систем врахована зміна параметрів та характеристик їх елементів. Розроблено показники, що дають змогу оцінювати основні властивості функціонування локальної електричної системи: балансову надійність, стабільність генерування ФЕС, потужність необхідного резерву для забезпечення балансової надійності ЛЕС. Запропоновано метод узгодження графіків генерування ФЕС та навантаження ЛЕС

Для оцінювання функціональної готовності ЛЕС вдосконалено відомий показник оцінювання якості. Суть вдосконалення полягає у визначенні вагових коефіцієнтів кожної складової в загальному критерії. Таким чином показник якості для i -го стану системи буде мати вигляд:

$$\Phi_i = \prod_{j=1}^n (k_{яj}^{v_{ij}}), \quad (1)$$

де $k_{я}$ – коефіцієнт якості, який характеризує режимну та балансову надійність в певному стані ЛЕС в умовах розбудови ВДЕ; v_{ij} – елементи матриці \mathbf{v} , яка є матрицею інтенсивностей переходів системи з одного стану в інший; n – кількість робочих станів досліджуваної системи.

Коефіцієнт якості $k_{я} = f(k_{\delta n}^n, k_U^B, k_{\Delta P}^Y)$ є функцією коефіцієнтів забезпечення балансової надійності генеруванням ФЕС $k_{\delta n}^n$, якості напруги k_U^B і втрат активної потужності $k_{\Delta P}^Y$. Ці складові мають безпосередній вплив на режимну і балансову надійність.

З урахуванням (1) та імовірності переходу між станами інтегральний показник якості набуде вигляду:

$$A = \sum_{i=1}^m p_i \Phi_i = \sum_{i=1}^m p_i \prod_{j=1}^n (k_{яj}^{v_{ij}}), \quad (2)$$

де m – кількість можливих станів досліджуваної системи; p_i – ймовірність перебування системи в i -му стані (визначається шляхом розв'язування системи рівнянь Колмогорова).

Коефіцієнт забезпечення балансової надійності ЛЕС $k_{\delta n}^n$ визначається на основі оцінювання потенційних можливостей генерування ФЕС задовольняти попит на електроенергію в ЛЕС. Оскільки таке генерування має імовірнісний характер, то доцільно говорити про імовірність забезпечення балансу між спожитою в ЛЕС та згенерованою ФЕС електроенергією. Найбільш точно визначити таку імовірність можна на основі оцінювання імовірнісних характеристик процесів генерування та електроспоживання в ЛЕС. Аналіз статистичних даних щодо потужностей генерування ФЕС та навантаження ЛЕС виконується в програмному середовищі STATISTICA 10. Для визначення

імовірнісних характеристик потужностей використовуються типові гістограми густин розподілу. На рис. 2, як приклад, в розрізі кожної доби в проміжок часу 12:30–13:00 протягом року для підстанції «Ямпіль 110/10 кВ» побудовані гістограми густин генерування і споживання потужностей (потужності подані у відносних одиницях, де за базис прийнято їх номінальні значення). З рис. 2 видно, що розподіл генерування ФЕС та навантаження – полімодальний. В тих випадках, коли «форму» розподілу не вдається описати одним розподілом, то її можна описати за допомогою суміші розподілів. Серед інших, можна виділити модель гаусової суміші, яка представляє собою зважену суму k компонентів, густина розподілу якого має вигляд:

$$p(x) = \sum_{j=1}^m w_j p_j(x), \quad (3)$$

де $p_j(x)$ – функція густини розподілу j -тої компоненти суміші; w_j – вага j -тої компоненти суміші (апріорна імовірність) $\sum_{j=1}^k w_j = 1, w_j \geq 0, j = 1 \dots k$ – кількість компонент в суміші.

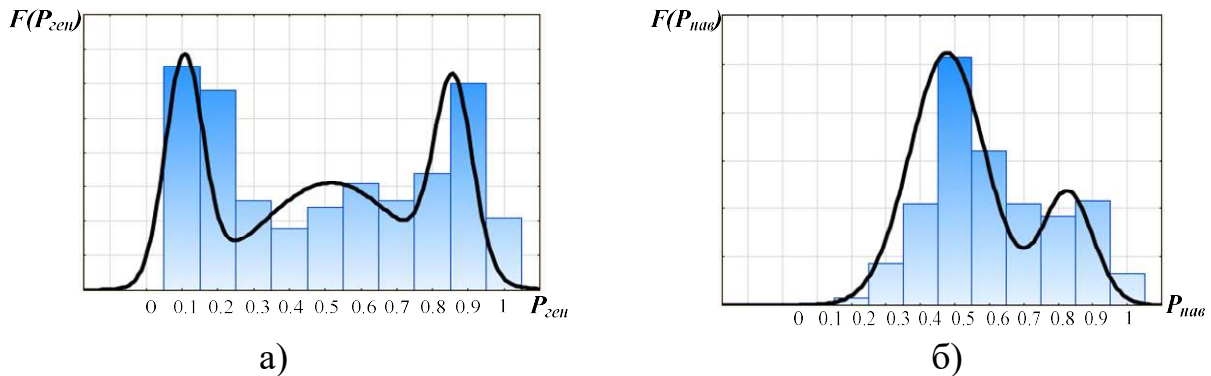


Рисунок 2 – Модель гаусової суміші для потужності генерування ФЕС (а) та для навантаження ЛЕС (б)

Функція густини розподілу має вигляд:

$$p_j(x) = \frac{1}{(2\pi)^{\frac{k}{2}} |\zeta_j|^{\frac{1}{2}}} e^{\left\{ \frac{-1}{2} (x-\mu_j)^T \zeta_j^{-1} (x-\mu_j) \right\}}, \quad (4)$$

де μ_j – математичне очікування j -тої компоненти; $|\zeta_j|$ – визначник коваріаційної матриці j -тої компоненти суміші, k – кількість компонент в суміші.

В задачі визначення розподілу випадкової величини на певному проміжку часу загальна математична модель розподілу буде описуватись рівнянням (3). Розщеплення гаусової суміші пропонується проводити за допомогою методу оцінки-максимізації (expectation-maximization) правдоподібності. EM-алгоритм складається з ітераційного повторення двох кроків. На E-кроці вираховуємо очікуване значення (expectation) вектора прихованих параметрів G за поточним наближенням вектора параметрів Θ . На M-кроці вирішується задача максимізації правдоподібності (maximization) і знаходиться наступне

наближення вектора Θ , за поточними значеннями векторів G та Θ .

Е-крок. Позначимо густину імовірності як $p(x, \theta_j)$, того що об'єкт x отриманий з j -тої компоненти суміші. Згідно з формулою умовної ймовірності:

$$p(x, \theta_j) = p(x)P(\theta_j | x) = w_j p_j(x). \quad (5)$$

Позначимо, $g_{ij} = P(\theta_j | x_i)$ – невідома апостеріорна імовірність того, що x_i отриманий з j -тої компоненти суміші. Приймаємо ці величини в якості прихованих змінних, тобто $G = (g_{ij}) = (g_1 \dots g_j)$, де g_j – j -й стовбець матриці G .

М-крок. Визначивши за формулою Байєса значення прихованих змінних g_{ij} , вирішуємо оптимізаційну задачу:

$$Q(\Theta) = \ln \prod_{i=1}^m p(x_i) = \sum_{i=1}^m \ln \sum_{j=1}^k w_j p_j(x_i) \rightarrow \max(\Theta). \quad (6)$$

Результатом розв'язування оптимізаційної задачі є імовірнісні характеристики процесів генерування та навантаження за критерієм максимуму правдоподібності. Маючи такі характеристики, визначено закон розподілу випадкових потужностей генерування ФЕС (рис.2а) та навантаження ЛЕС (рис.2 б). На основі визначених характеристик, маючи вагу кожної компоненти генерування та навантаження, можна визначити імовірність видачі певної потужності генерування ФЕС та навантаження.

Для цього пропонується розбити кожну компоненту генерування та навантаження на складові з певним кроком (чим менший крок, тим точність розрахунку вища) та знайти імовірність їх появи за допомогою інтегралу імовірності:

$$F(X_u) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{X_u}^{X_{u+1}} e^{-\frac{r^2}{2}} dX_u, \quad (7)$$

де $r = \frac{(X_u - \mu)}{\sigma}$, а X_u відповідно приймає значення X_u та X_{u+1} кожної складової компоненти генерування ФЕС чи споживання; μ – математичне очікування; σ – середньоквадратичне відхилення.

Визначивши імовірність появи u -тої складової компоненти генерування $p_{ген_u}$ та навантаження $p_{нав_u}$, визначаємо імовірність покриття u -тої компоненти навантаження генеруванням ФЕС:

$$p_{покр.u_t} = p_{нав.u_t} \cdot \sum_{\substack{z=1 \\ p_{нав.u_t} \leq p_{ген.z_t}}}^f p_{ген.z_t}, \quad (8)$$

де f – кількість складових компонент генерування; t – часовий проміжок, на якому визначається імовірність покриття споживання генеруванням ФЕС.

Коефіцієнт стабільності, що має зміст імовірності покриття навантаження генеруванням ФЕС на заданому часовому проміжку, дорівнює сумі імовірностей покриття всіх складових компонент навантаження:

$$k_{стаб.t} = \frac{1}{b} \sum p_{покр.u_t}, \quad (9)$$

де t – часовий проміжок, на якому оцінюється стабільність генерування ФЕС; b – кількість часових проміжків, протягом яких оцінюється стабільність генерування ФЕС.

Забезпечення належного рівня балансової надійності генеруванням ФЕС, неможливе в силу їх нестабільності, тому необхідним є визначення потужності резерву, який має забезпечуватись від ЕЕС. Задача визначення оптимальної потужності резерву ЛЕС незалежно від принципів керування повинна відповідати мінімуму приведених витрат на підтримання потужності резерву та враховувати затрати, що будуть компенсуватись в разі незабезпечення балансової надійності споживачів ЛЕС. Отже, цільову функцію можна записати:

$$B_{\Sigma} = B(P_p) + B(P_{ПС}) + B(\Delta W) \rightarrow \min, \quad (10)$$

де $B(P_p) = \epsilon_{P_p}^{num} \cdot P_p$ – витрати на резерв генерувальної потужності P_p для ЛЕС; $B(P_{ПС}) = \epsilon_{P_{ПС}}^{num} \cdot P_{ПС}$ – витрати на запаси пропускнуої спроможності ліній електропередач (ПСЛЕП); $\epsilon_{P_p}^{num}$, $\epsilon_{P_{ПС}}^{num}$ – питомі витрати (грн/кВт) на створення резерву генерування для ЛЕС і витрати на підтримання запасу по ПСЛЕП відповідно; $B(\Delta W) = \epsilon_0 \cdot M[\Delta W]$ – витрати на компенсацію споживачам за недовідпущену електроенергію, ϵ_0 – питома вартість кВт год недовідпущеної електроенергії (грн/кВт год), $M[\Delta W]$ – математичне очікування недовідпуску електроенергії в ЛЕС, що зумовлене наявністю нестабільного генерування ФЕС.

$$M[\Delta W] = T_p P_n (1 - k_{нестаб}), \quad (11)$$

де T_p – час, для якого оцінюється математичне очікування недовідпущеної електроенергії; P_n – потужність навантаження; $k_{нестаб} = (1 - k_{стаб})$ – імовірність появи дефіциту потужності.

Таким чином, витрати на компенсацію споживачам за недовідпущену електроенергію запишемо у вигляді:

$$B(\Delta W) = \epsilon_0 \cdot T_p P_n k_{нестаб}. \quad (12)$$

Коефіцієнт нестабільності $k_{нестаб}$ змінює своє значення відповідно до потужності резерву: при збільшенні потужності резерву він зменшується, а при зменшенні – навпаки зростає (залежність 2). Оптимальному рівню надійності ЛЕС відповідає значення мінімуму приведених витрат на резервування B_{Σ} (залежність 1). Враховуючи лінійність взаємозв'язку витрат на створення резерву потужності $B(P_p)$ зі значенням резерву $B(P_p) = \epsilon_{P_p}^{num} \cdot P_p$, залежність 3 (див. рис. 3), і пропорційність математичного очікування компенсаційних витрат $B(\Delta W)$ по недовідпущеній електроенергії $M[\Delta W]$ кінцевому споживачу, можна знайти мінімум цільової функції (10):

$$\frac{\partial B_{\Sigma}}{\partial P_p} = \frac{\epsilon_{P_p}^{num} \cdot P_p}{\partial P_p} + \epsilon_0 \frac{\partial M[\Delta W]}{\partial P_p} = 0. \quad (13)$$

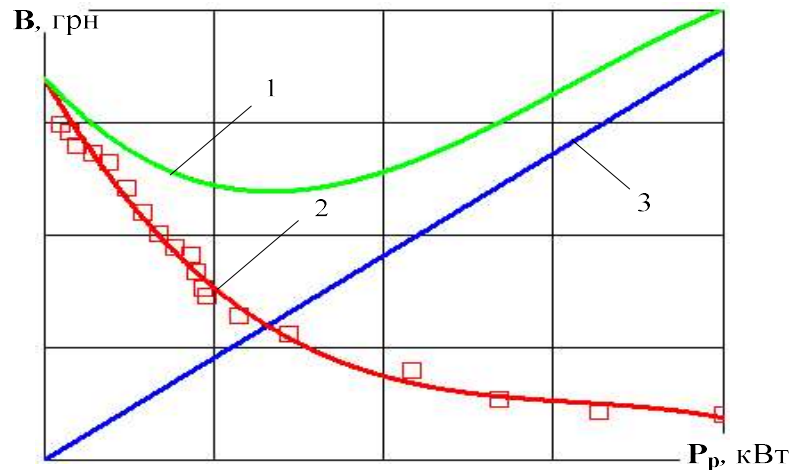


Рисунок 3 – Графічне зображення взаємозв'язку іменованих та відносних (імовірнісних) показників балансової надійності в ЛЕС

1– сумарні витрати на резерв, 2 – залежність витрат енергопостачальної компанії за недовідпущену електроенергію, 3 – витрати на підтримання потужності резерву.

Визначена за (13) потужність резерву відповідає мінімуму приведених витрат енергопостачальної компанії на забезпечення потужності резерву.

Забезпечення резерву в будь-якому випадку викликає додаткові витрати, тому розглядається випадок, коли за рахунок узгодження графіків генерування ФЕС та навантаження його потужність можна зменшити. Окрім цього, запропонований метод дозволяє отримати ряд позитивних техніко-економічних та режимних ефектів.

Оскільки конфігурацію електричної мережі можна вважати відносно постійною, то за допомогою коефіцієнтів матриці струморозподілу можна визначити споживачів, графік навантаження яких найбільше впливає на сумарну нерівномірність добового графіка електричних навантажень ЛЕС, спричиненою генерування ФЕС.

Застосування такого підходу, в задачі вирівнювання добового ГЕН, дозволяє не тільки зменшити нерівномірність останнього, а й зменшити втрати електроенергії в ЛЕС. Для зменшення нерівномірності сумарного добового ГЕН ЕМ та мінімізації втрат активної потужності пропонується коригувати графік кожним вузлом по черзі відповідно до коефіцієнта струморозподілу. Для розв'язання цієї задачі скористаємося класичною транспортною задачею, в якій умовно можна виділити m годин, в які власне споживання вузла більше за генерування ФЕС, A_1, \dots, A_m , та n годин, в які генерування ФЕС переважатиме споживання вузла, Z_1, \dots, Z_m . Для цього використовуються потужності вузлів, уточненні шляхом множення на коефіцієнт струморозподілу. Відносну вартість V_{ij} переносу потужності з одного часового проміжку графіка на інший визначатимемо:

$$V_{ij} = P_{zm} \cdot C_m (K_{Tj} - K_{Ti}) + \beta - \delta P \cdot C_m, \quad (14)$$

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_{zm} – потужність, яку споживач має змитити для вирівнювання графіка навантаження ЛЕС, кВт; C_m – тариф на електроенергію по енергопостачальній компанії, грн. / кВт год; β – вартість технологічного зсуву виробництва, що має бути компенсована енергосистемою, грн; δP – зменшення втрат потужності внаслідок коригування графіка навантаження споживача, кВт;

З урахування вартостей переносу потужностей, транспортна матриця для даної задачі має вигляд (табл.1)

Таблиця 1 – Транспортна матриця задачі вирівнювання добового ГЕН ЛЕС

B_{11}	B_{12}	B_{13}	B_{14}	B_{15}	B_{16}	B_{17}	...	...	B_{1i}	Z_1
B_{21}	B_{22}	B_{23}	B_{24}	B_{25}	B_{26}	B_{27}	...	...	B_{2i}	Z_2
...
B_{j1}	B_{j2}	B_{j3}	B_{j4}	B_{j5}	B_{j6}	B_{j7}	...	...	B_{ji}	Z_n
A_1	A_2	A_3	A_4	A_5	A_6	A_7	...	...	A_m	

Очевидно, що значення відносних вартостей B_{ij} для кожного вузла будуть відрізнятись. Відповідно до поставленої задачі запишемо цільову функцію:

$$\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n B_{ij} \cdot P_{ij} \rightarrow \min, \quad (15)$$

де P_{ij} – потужність, яку потрібно змитити з однієї ступені графіка навантаження в іншу.

Перша група обмежень вказує, що потужність на будь-якій ступені ГЕН повинна дорівнювати сумарній потужності споживання електроенергії цієї ступені ГЕН: $\sum_{i=1}^m P_{ij} = A_i$. Друга група обмежень вказує, що сумарний зсув споживання на деяку ступень ГЕН повинен повністю компенсувати генерування на цій ступені: $\sum_{j=1}^n P_{ij} = Z_j$. Також вводиться обмеження на неможливість зміщення від'ємних значень потужності споживання: $P_{ij} \geq 0, i = 1, 2 \dots m, j = 1, 2 \dots n$.

Залежність режиму роботи відновлюваних джерел енергії від природних умов в більшості випадків призводить до погіршення режиму роботи розподільних електричних мереж. Тому необхідно виконувати штучне узгодження графіків навантаження і ВДЕ. Особливо це стосується фотовольтаїчних електричних станцій. Запропоновано метод на основі застосування морфометричного аналізу графіків споживання, оптимальних коефіцієнтів струморозподілу і транспортної задачі дозволяє розв'язати задачу вирівнювання сумарного графіка електроспоживання ЛЕС і зниження втрат електроенергії в розподільних електричних мережах.

У **третьому розділі** виконується алгоритмічна реалізація запропонованих у другому розділі методів. Розроблено алгоритми визначення показника якості

функціонування локальної електричної системи, визначення показника оцінки стабільності генерування ФЕС для забезпечення балансової надійності ЛЕС, визначення ємності та графіка роботи накопичувача електроенергії ФЕС з урахуванням нестабільності її генерування, визначення імовірності забезпечення нормативних значень відхилення рівня напруг у вузлах та втрат потужності в ЛЕС, визначення оптимальної потужності генерування ФЕС на основі оцінювання якості функціонування ЛЕС, узгодження графіків генерування ФЕС та електричного навантаження ЛЕС.

На основі аналізу стабільності покриття запропонований алгоритм визначення імовірностей покриття та не покриття графіка навантаження (див.рис.4).

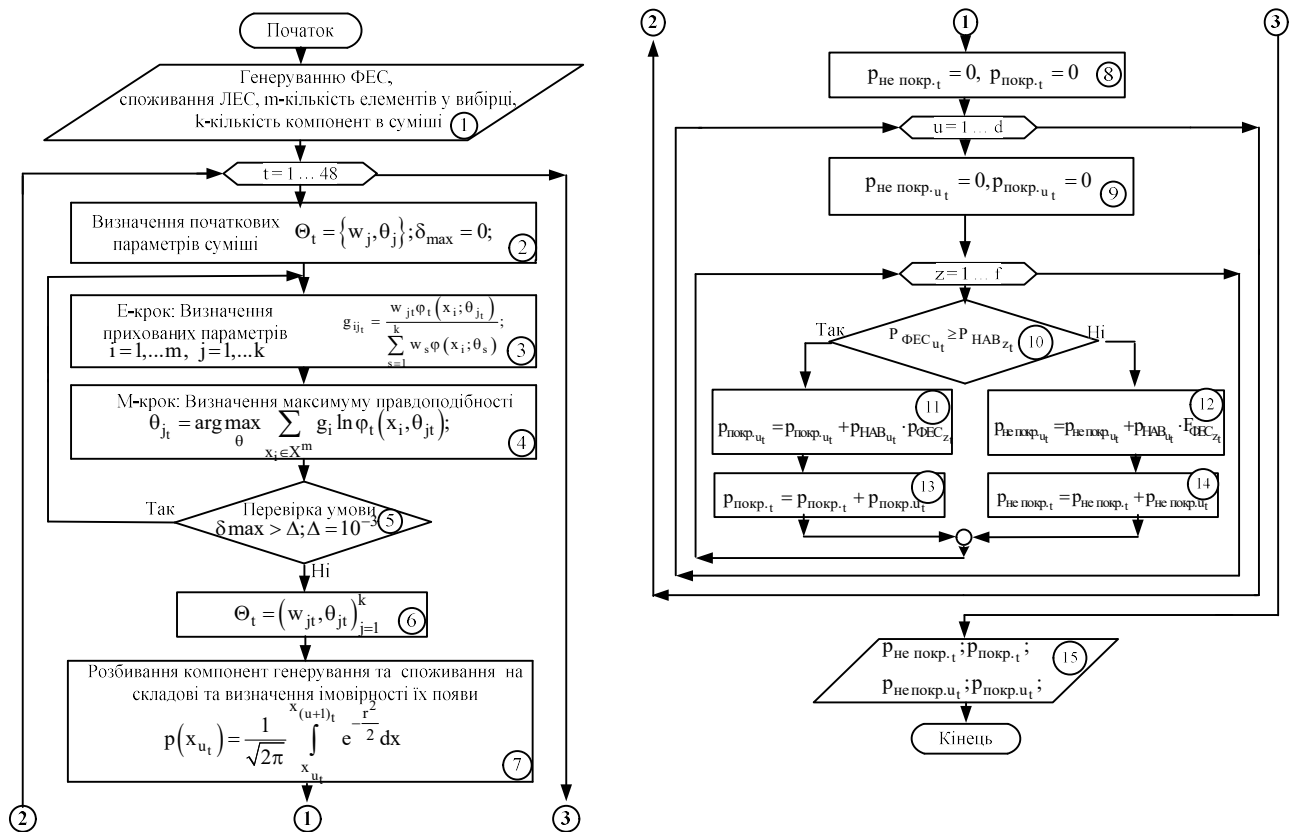


Рисунок 4 – Алгоритм визначення ймовірності покриття графіка навантаження ЛЕС генеруванням ФЕС

Відповідно до EM-алгоритму (блоки 1–6), маючи початкові дані процесів генерування та електроспоживання (блок 1) та початкове наближення параметрів сумішей і критерій зупинки (блок 2), визначаються параметри суміші гаусових розподілів (математичне очікування, середньоквадратичне відхилення та вага компоненти суміші). В блоці 3 визначається $g_{ij} = F(\theta_j | x)$ – невідома апостеріорна ймовірність того, що елемент вибірки взято з j -ої компоненти суміші. Таку ймовірність можна визначити, використовуючи формулу Байєса. В блоці 4 визначаються оптимальні ваги компонентів суміші w_j за критерієм максимуму правдоподібності. Ітераційний процес зупиняється,

коли значення функціоналу $Q(\Theta) = \ln \prod_{i=1}^m p(x_i) = \sum_{i=1}^m \ln \sum_{j=1}^k w_j p_j(x_i) \rightarrow \max(\Theta)$ або значення прихованих змінних G перестають суттєво змінюватись (блок 5). Отримані параметри суміші розподілів генерування ФЕС та електроспоживання (блок 6) за допомогою інтегралу імовірності розбираються на складові з певним кроком (блок 7). Слід зауважити, що чим менший крок розбиття суміші, тим точність розрахунку більша. В блоках 8, 9 задаються початкові наближення ймовірності покриття та не покриття графіка навантаження власним генеруванням ФЕС. Якщо складові компоненти суміші генерування більша за складові компоненти суміші графіка електричного навантаження (блок 10), то визначається ймовірність покриття ГЕН (блок 11) і, відповідно, не покриття ГЕН (блок 12). В блоках 13, 14 визначається сумарна ймовірність покриття та не покриття графіка навантаження генеруванням ФЕС. У блоці 15 виводяться ймовірності, визначені в блоках 11-14.

Ймовірність покриття та не покриття графіка навантаження, дозволяє визначити математичне очікування надлишку та дефіциту потужності на t -му проміжку часу доби:

$$M_{над_t} = \sum_u \overrightarrow{p_{покр_u}} \cdot \overrightarrow{P_{нав_u}} \quad \text{та} \quad M_{деф_t} = \sum_u \overrightarrow{p_{непокр_u}} \cdot \overrightarrow{P_{нав_u}} \quad (16)$$

де $p_{покр_u}$ – ймовірність покриття графіка навантаження, $p_{непокр_u}$ – ймовірність не покриття графіка навантаження, $P_{нав_u}$ – потужність навантаження.

Таким чином, маючи дані щодо надлишку та дефіциту потужності (16), можна визначити ємність накопичувача та графік його роботи.

У **четвертому розділі** показано ефективність використання розроблених математичних моделей та алгоритмів шляхом виконання обчислювальних експериментів на фрагменті схеми Ямпільських РЕМ (див. рис.5).

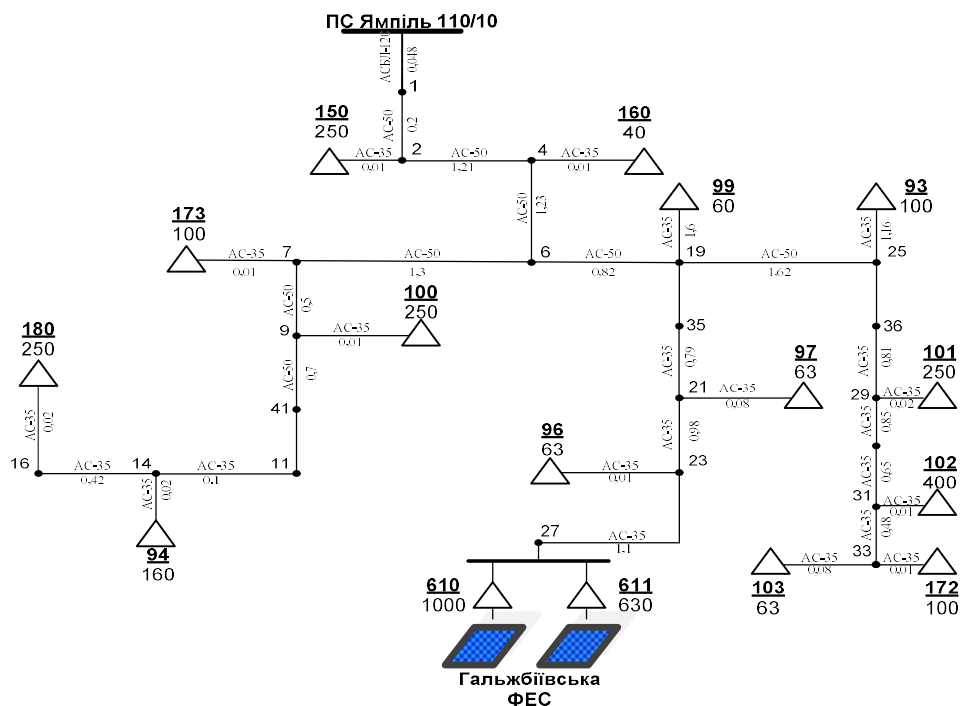


Рисунок 5 – Схема живильного фідера Ф-15 Ямпільських РЕМ

Підтверджена доцільність застосування методів щодо визначення оптимальної, за критерієм мінімуму приведених витрат енергопостачальної компанії, потужності резерву та узгодження графіків генерування ФЕС та навантаження ЛЕС. Нормальна схема видачі потужності електростанцією передбачає, що електроенергія, генерована ФЕС, через КТП 0,4/10 – 630 кВА та 0,4/10 – 1000кВА лінією 27–23 видається в мережу, яка з'єднана з підстанцією «Ямпіль» 110/10. Протяжність ліній фідера 15 ПС «Ямпіль» 110/10 становить 18 км. Даний фідер містить: 37 вузлів, 16 трансформаторних підстанцій, Гальжбіївську ФЕС потужністю 1431 кВт. Сумарна потужність трансформаторних підстанцій від яких живляться споживачі становить 2 149 кВт.

Показано, що встановлена потужність генерування Гальжбіївської ФЕС є не оптимальною при нині існуючому споживанні в ЛЕС. Такий висновок зроблено на основі оцінювання показника якості функціонування (див. рис.6).

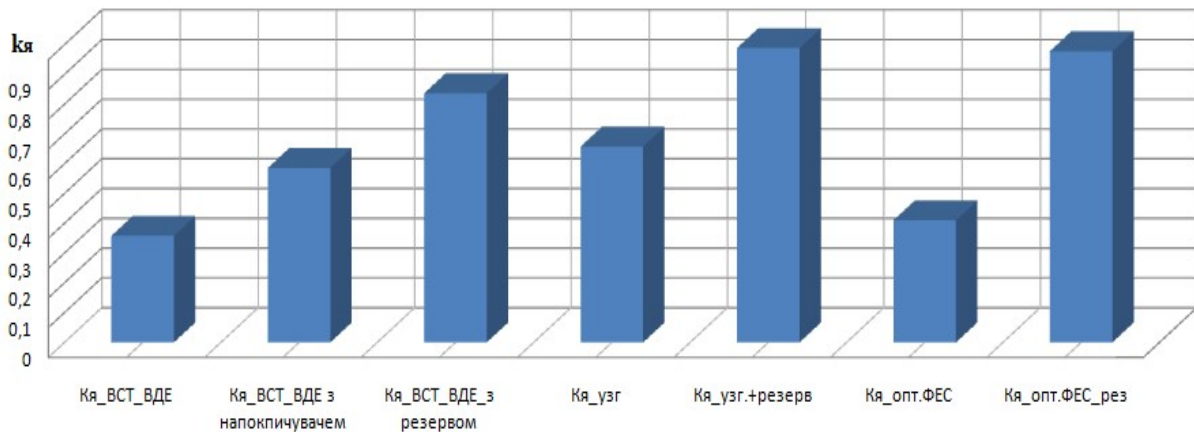


Рисунок 6 – Оцінювання різних способів підвищення якості електропостачання ЛЕС

Отримати переваги від генерування фотовольтаїчних електростанцій можливо за рахунок впровадженню додаткових засобів. В роботі розглянута можливість використання накопичувачів електричної енергії, узгодження графіків генерування ФЕС та локального електроспоживання, визначення оптимальної потужності генерування ФЕС та визначення потужності резерву, що має забезпечувати енергопостачальна компанія. Всі перелічені вище засоби (див. рис. 6), по різному впливають на якість функціонування ЛЕС. За запропонованим показником можна визначити, який із них здатен в більшій мірі підвищить рівень якості електропостачання ЛЕС.

Серед розглянутих засобів найвищий коефіцієнт якості функціонування має узгоджений графік генерування ФЕС з електроспоживанням ЛЕС з визначеною потужністю резерву $k_{я_узг.\ з\ резервом} = 0.989$.

Для узгодженого з локальним електроспоживанням графіка генерування ФЕС потужність резерву буде найменшою (див.рис.7).

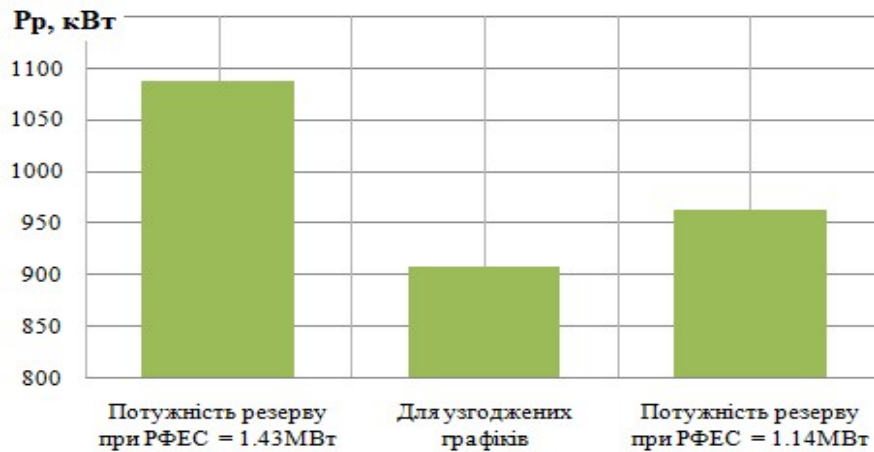


Рисунок 7 – Зміна потужності резерву для різних засобів підвищення балансової надійності ЛЕС

Результати проведених розрахунків підтверджують позитивний вплив джерел розосередженого генерування на режимну та балансову надійність локальних електричних систем. Проте міра цього позитивного впливу може бути різною в залежності від типу відновлюваних джерел та характеру навантаження в ЛЕС. Можна стверджувати, що позитивний ефект від використання ФЕС електричних мережах отримується лише за умови їх узгодженого генерування з графіком локального електроспоживання.

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ВИСНОВКИ

В роботі отримано нове вирішення актуальної науково-прикладної задачі підвищення балансової надійності локальних електричних систем та покращення якості їх функціонування шляхом розроблення моделей і методів визначення оптимальних встановлених потужностей фотовольтаїчних електростанцій.

Проведені дослідження дозволили отримати такі результати:

1. Оскільки розподільні електричні мережі зі зростанням в них частки відновлювальних джерел електроенергії (ВДЕ) набувають ознак локальної електричної системи (ЛЕС), то виникає необхідність створення в них умов для підтримання балансу активної потужностей. Від того, наскільки успішно підтримується баланс потужностей в ЛЕС (балансова надійність), залежить, чи параметри режиму знаходяться в допустимих межах своїх нормативних значень. Показано, що визначальним фактором забезпечення балансової надійності в локальній електричній системі з значною часткою ВДЕ є стабільність останніх. Для забезпечення ефективної роботи ЛЕС, в умовах розбудови таких нестабільних джерел як фотовольтаїчні електричні станції (ФЕС), необхідно розробляти методи для оцінювання рівня нестабільності для подальшого його використання під час визначення оптимальної встановленої потужності станцій та величини резерву в системі для забезпечення балансової надійності.

2. Для визначення ймовірнісних характеристик процесу генерування ФЕС та використання їх для підвищення ефективності функціонування електричної

мережі ЛЕС розроблено модель гаусової суміші для графіків потужностей генерування ФЕС та навантаження. В результаті розщеплення гаусової суміші отримано основні статистичні характеристики (математичне очікування, середньоквадратичне відхилення) процесів генерування ФЕС та навантаження, що є вихідною інформацією для оцінювання стабільності генерування ФЕС. На основі аналізу ймовірнісних характеристик процесів генерування фотовольтаїчних електростанцій вдосконалено метод визначення коефіцієнта стабільності їх генерування, що дозволяє більш обґрунтовано враховувати ймовірнісний характер генерування ФЕС в задачах підвищення енергоефективності ЛЕС, наприклад, для визначення резерву потужності в ній.

3. Енергоефективність роботи ЛЕС залежить від різних факторів і характеризується різними параметрами. Тому оцінювання енергоефективності лише за одним з них не дозволяє отримати повну картину, особливо в умовах розбудови ФЕС. Показано, що для оцінювання енергоефективності ЛЕС, що включає в себе надійність і економічність електропостачання споживачів якісною електроенергією споживачів, доцільно користуватися інтегральним показником якості функціонування. Стосовно ЛЕС метод оцінювання якості її функціонування за допомогою інтегрального показника вдосконалено шляхом визначення вагових коефіцієнтів його складових. Показник якості функціонування локальної електричної системи дозволяє визначити функціональну готовність щодо забезпечення якісного електропостачання, а також оцінити вплив ФЕС на енергоефективність ЛЕС.

4. Додаткові капіталовкладення в забезпечення резерву локальних електричних систем повинні бути обґрунтовані відповідним техніко-економічним розрахунком. Розроблено метод визначення оптимальної потужності резерву для фотовольтаїчних електростанцій в локальній електричній системі за критерієм мінімуму приведених витрат енергопостачальної компанії, що дозволяє компенсувати нестабільність процесу генерування ФЕС і підвищити балансову надійність. Якщо резервування здійснюється з накопиченням електроенергії від ФЕС і в результаті забезпечується можливість балансування потужності в широкому діапазоні, то створюються умови для генерування ФЕС за заявленим на наступну добу графіком.

5. Шляхом аналізу взаємовпливу графіків роботи електроспоживачів і фотовольтаїчних електричних станцій встановлено, що найбільший техніко-економічний ефект від використання ФЕС в електричних мережах отримується лише за умови узгодження графіка їх генерування з сумарним графіком електроспоживання локальної електричної системи. Запропоновано новий метод узгодження графіків електричних навантажень локальної електричної системи і генерування фотовольтаїчних електростанцій в ній. Метод ґрунтується на визначенні споживачів, узгодження графіків яких дозволить максимально використати енергію генеровану ФЕС з мінімальним завантаженням елементів ЛЕС. В результаті це дозволяє зменшити втрати електроенергії в мережі, покращити якість напруги і, як наслідок, підвищити енергоефективність системи електропостачання;

6. За результатами проведених теоретичних досліджень розроблено програму, що дозволяє на основі аналізу нерівномірності сумарного добового графіка локальної електричної системи визначити необхідний об'єм зміщення графіка споживання протягом доби для забезпечення максимального вирівнювання сумарного добового графіка. Узгодження графіків електричних навантажень локальної електричної системи і генерування фотовольтаїчних електростанцій в ній дозволяє підвищити енергоефективність системи електропостачання шляхом зменшення втрат електроенергії в мережі, покращання якості напруги та збільшення надійності електропостачання споживачів. В програмі використано апарат морфометричного аналізу для оцінювання рівномірності графіків електричних навантажень ЛЕС і генерування ФЕС.

7. Працездатність та ефективність запропонованих у роботі методів і алгоритмів підтверджена обчислювальними експериментами з оптимізації та керування режимами ЛЕС з відновлювальними джерелами енергії. На основі отриманих у роботі умов оптимальності, методів та алгоритмів вдосконалено комплекс програм інтелектуальної підтримки роботи диспетчера ЛЕС, який передано для дослідної експлуатації до ТОВ «Подільський енергоконсалтинг» та ТОВ «Енергоінвест». Матеріали дисертаційного дослідження використовуються також у навчальному процесі.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Лежнюк П. Д. Оцінювання стабільності генерування сонячних електростанцій у задачі забезпечення балансової надійності / П. Д. Лежнюк, В. О. Комар, С. В. Кравчук // Наукові праці ВНТУ. – № 2. – 2016. – С. 1-8. Режим доступу: <https://praci.vntu.edu.ua/index.php/praci/article/view/471/469>

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

3. Лежнюк П.Д. Врахування нестабільності генерування енергії відновлюваними джерелами в задачі вирівнювання добового графіка електричних навантажень// П.Д. Лежнюк, В.О. Комар, С.В. Кравчук/ Вісник Харківського Національного Технічного Університету Сільського Господарства Імені Петра Василенка. Технічні науки. Випуск 176 "Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України". – Харків: ХНТУСГ, 2016. – С.15–18. ISBN 5-7987-0176X.

4. Лежнюк, П. Д. Визначення оптимальної потужності резерву для забезпечення балансової надійності локальної електричної системи/ П. Д. Лежнюк, В. О. Комар, С. В. Кравчук // Вісник НТУ «ХП». – Харків: НТУ «ХП». – 2016. – № 42 (1214). – С. 69-75. – doi: 10.20998/2413-4295.2016.42.11.

5. Лежнюк П.Д. Узгодження графіків генерування відновлюваних джерел енергії та електричного навантаження в локальній електричній системі// П.Д.

Лежнюк, В.О. Комар, С.В. Кравчук/ Вісник Харківського Національного Технічного Університету Сільського Господарства Імені Петра Василенка. Технічні науки. "Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України". – Харків: ХНТУСГ. №2.– 2016. – С.30 –37. ISSN 2311-0767

6. Лежнюк П.Д. Оптимізація схем під'єднання нетрадиційних і відновлювальних джерел електроенергії в електричних мережах /П.Д. Лежнюк., С.В. Кравчук// Вісник Чернігівського державного технологічного університету. Серія «Технічні науки». – 2014.– №2.– с. 168-173.

7. Лежнюк П.Д. Використання принципу найменшої дії для вдосконалення керування нормальними режимами ЕЕС/ П.Д. Лежнюк, В.І. Нагул., В.В. Нетребський, С.В. Кравчук// Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія «Електротехніка і енергетика». – 2013. – Вип.1(14). – с.159 -162

8. Lezhniuk P.D. The influence of distributed power sources on active power loss in the microgrid // Petro Lezhniuk, Iryna Hunko, Sergiy Kravchuk, Paweł Komada, Konrad Gromaszek, Assel Mussabekova, Nursanat Askarova, Abenar Arman/ PRZEGLĄD ELEKTROTECHNICZNY. – R. 93. – NR 3/2017. – P. 107–112. – ISSN 0033-2097. – doi:10.15199/48.2017.03.25

9. Lezhniuk P.D. Reconciliation of generation graphics of renewable energy sources and load with help of morphometric analysis / P.D. Lezhniuk, V.O. Komar, S.V. Kravchuk // – Vol 9. – No 16 (2016): International collection of scientific proceedings «European cooperation». – p. 26-35. – ISSN. 2449 – 7320.

10. Lezhniuk P.D. Assessment stability generation of solar power plants in the problems of providing balance reliability / P.D. Lezhniuk, V.O. Komar, S.V. Kravchuk, J-P. Ngoma // – Vol 4. – No 9 (2016). Sciences of Europe. – p. 90-96. – ISSN. 3162 – 2364.

11. Lezhniuk P.D. The influence of the dispersed energy sources on the energy losses in electrical grids / P.D. Lezhniuk, S.V. Kravchuk, I.O. Hunko, J-P. Ngoma// – Vol 1. – No 1 (2016). The scientific method. – p. 3-12. – ISSN. 2301 – 2048.

12. Лежнюк П.Д. Підвищення балансової надійності в електричних мережах з відновлювальними джерелами енергії / П.Д. Лежнюк, В.О. Комар, С.В. Кравчук // XIII Міжнародна науково-технічна конференція «КУСС – 2016», 3 - 4 жовтня 2016 р., Вінниця, Україна: тези доп./ Вінницький національний технічний університет. – Вінниця, 2016.– С. 196-198.

13. Лежнюк П.Д. Оцінювання балансової надійності в електричних мережах з сонячними електричними станціями шляхом аналізу їх імовірнісних характеристик генерування/ П.Д. Лежнюк, О.А. Ковальчук, В.О. Комар, С.В. Кравчук // Матеріали XVII міжнародної науково-практичної конференції «Відновлювальна енергетика та енергоефективність у XXI столітті», 29 - 30 вересня 2016 р., Київ, Україна: тези доп./ Інститут відновлювальної енергетики НАН України. – Київ, 2016.– С. 300-305.

14. Лежнюк П.Д. Дослідження впливу відновлювальних джерел електроенергії на режим роботи електричних мереж / П.Д. Лежнюк, С.В. Кравчук // III Міжнародна науково-технічна конференція «Оптимальне керування електроустановками (ОКЕУ-2015)», 14-15 жовтня 2015 року,

Вінниця, Україна: тези доп./ Вінницький національний технічний університет. – Вінниця, 2015. – С. 33.

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

АНОТАЦІЯ

Кравчук С.В. Оптимізація потужностей генерування фотовольтаїчних електростанцій в задачах забезпечення балансової надійності локальних електричних систем. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.14.02 – Електричні станції, мережі і системи. – Вінницький національний технічний університет. – Вінниця, 2017.

Дисертаційну роботу присвячено підвищенню балансової надійності локальних електричних систем за рахунок визначення оптимальної потужності генерування ФЕС та розробленню методів, що дозволяють зменшити нестабільність їх генерування.

Визначаючи пріоритетність розв'язання задач в ЛЕС, відмітимо балансову надійність як надійність ЛЕС, коли її розрахункова модель визначається балансом споживання і генерування електроенергії з врахуванням зовнішнього поступлення. Від того, якими способами і засобами забезпечується балансова надійність, залежить як успішно розв'язуються інші задачі. Від балансу активної і реактивної потужності в ЛЕС залежать її техніко-економічні показники.

В роботі показано, що для оцінювання енергоефективності електричних мереж, яка включає в себе надійність і економічність електропостачання споживачів, доцільно користуватися інтегральним показником якості функціонування. Для більш ґрунтового оцінювання якості функціонування ЛЕС показник якості вдосконалено за рахунок визначення вагових коефіцієнтів його складових. Даний показник дозволяє визначити функціональну готовність щодо забезпечення надійного і якісного електропостачання, а також оцінити вплив ФЕС на енергоефективність ЛЕС.

Нестабільність генерування ФЕС, як і інших ВДЕ, є одним з суттєвих факторів, що впливають на баланс потужності в ЛЕС і, як наслідок, на відповідність параметрів режиму нормативним значенням. На основі аналізу ймовірнісних характеристик процесів генерування ВДЕ, зокрема ФЕС, та навантаження вдосконалено метод визначення коефіцієнта стабільності генерування ВДЕ. Даний показник є імовірністю забезпечення споживачів електроенергії ЛЕС електроенергією генерування ВДЕ. На основі такого визначеного показника стабільності запропоновано метод визначення оптимальної потужності резерву за критерієм мінімуму приведених витрат енергопостачальної компанії. Також показано зв'язок між відносними показниками балансової надійності та іменованими, зокрема математичним очікуванням недовідпуску електроенергії в електричних мережах з ВДЕ.

З урахування нестабільності процесу генерування ФЕС запропоновано метод зменшення нерівномірності графіка електричних навантажень ЛЕС. Такий метод окрім зменшення нерівномірності сумарного графіка електричних навантажень ЛЕС дозволяє зменшити втрати електроенергії в мережі та мінімізувати витрати енергопостачальних компаній на стимулювання споживачів до зміщення графіка навантаження. Зменшення витрат досягається за рахунок вибору оптимальних вузлів для вирівнювання сумарного графіка навантаження ЛЕС.

Ключові слова: відновлювальні джерела енергії, фотовольтаїчна електростанція, нестабільність, якість функціонування, локальна електрична система, узгодження графіків, потужність резерву, втрати потужності.

ABSTRACT

Kravchuk S.V. Optimization of power generation of photovoltaic electric stations in the tasks of ensuring the balance reliability of local electrical systems.

– The manuscript.

Thesis for PhD degree in technical sciences on the speciality 05.14.02 - electric power stations, networks and systems. – Vinnytsia National technical University. - Vinnytsia, 2017.

Due to the fact that non-traditional and renewable energy sources are being developed in electric networks, the latter take signs of local electrical systems (LES). This means that in relation to them there are problems that are typical of electric power systems (EPS) with large thermal, nuclear and hydro power plants. These include ensuring the reliability of consumers' electricity supply, maintaining voltage levels within acceptable limits, optimizing power flows in order to reduce losses, and maintaining balance sheet reliability in a LES with combined power supply from local and centralized energy sources.

Determining the priority of solving tasks in the LES, note the balance reliability as the reliability of LES, when its calculated model is determined by the balance of consumption and generation of electricity, taking into account the external income. From what methods and means the balance reliability is ensured, depends on how other tasks are successfully solved. The balance of active and reactive power in the LES depends on its technical and economic indicators. The process of balancing power in the LES is significantly influenced by the instability of generation of renewable energy sources (RES), in particular photovoltaic electric stations (PES). The instability of the PES generation is compensated by the power supplied to the LES from the UES. Because of the conditions for balancing the regime of LES, they also affect the regimes of the EES.

It is known that the use of RES in LES can be carried out according to different criteria of optimality. Accordingly, their participation in maintaining the balance of active and reactive power in the LES is different. For example, when optimizing daily REE to ensure maximum revenue from the sale of their electricity and minimize the electricity supply for consumers to the LES from the electricity market, maintenance of the balance of reliability is carried out by the EES. In this case, the task is to evaluate the instability of the generation of PES and to determine the power reserve

on the part of the LES, which is necessary to ensure the balance reliability of the LES.

The dissertation is devoted to the development of methods for increasing the balance reliability of distributive electrical networks and improving their quality of functioning by determining the optimal capacities of generation of PES.

The following scientific results were obtained in the work:

As distributive electric networks with growth in them, the shares of renewable energy sources acquire the signs of a local electrical system, then it is necessary to create conditions for them to maintain the balance of active and reactive power. The extent to which the balance of power in the LES (balancing reliability) is successfully maintained depends on whether the mode parameters are within the permissible limits of their normative values. It is shown that the stability of the latter is the determining factor for providing balance reliability in a local electrical system with a significant share of RES. In order to ensure the effective operation of the LES, in the conditions of developing such unstable sources as PES, it is necessary to develop methods for assessing the level of instability for its further use in determining the optimal capacity of stations and the size of the reserve in the system to ensure balance reliability.

Determination of the probabilistic characteristics of the process of generation of the PES and their use for increasing the efficiency of the operation of the power network of the LES. A model of the Gaussian mixture for the PES and load generating capacity graphs has been developed. As a result of the splitting of the Gaussian mixture, the basic statistical characteristics (mathematical expectation, mean square deviation) of the PES generation and load generation are obtained, which is the source information for estimating the stability of the PES generation. On the basis of the analysis of probabilistic characteristics of the processes of generation of photovoltaic power stations, the method of determining the coefficient of stability of their generation has been improved, which allows more reasonably to take into account the probabilistic nature of the generation of PES in the tasks of increasing energy efficiency of LES, for example, to determine the power reserve in it.

For the assessment of energy efficiency only one of them does not allow a complete picture to be obtained, especially in terms of the development of PES.

It is shown that in order to assess the energy efficiency of LES, which includes the reliability and efficiency of consumers electricity supply with high-quality consumers, it is advisable to use an integral indicator of the quality of functioning. Regarding the LES, the method of assessing the quality of its operation with the help of the integral indicator was improved by determining the weight coefficients of its components. The indicator of the quality of the functioning of the local electrical system can determine the functional readiness for providing reliable and high-quality power supply, as well as assess the impact of the PES on the energy efficiency of LES.

A method of determining the optimal reserve capacity for photovoltaic electric stations in a local electrical system has been developed based on the criterion of the minimum cost of the energy supply company, which compensates for the instability of the PES generation process and improves the balance reliability. If the reservation is made with the accumulation of electricity from the PES and as a result provides the

possibility of balancing power in a wide range, then conditions are created for the generation of PES for the scheduled application for the next day.

Analysis of the interaction of schedules of the work of electric consumers and photovoltaic electric stations allowed to establish that the greatest technical and economic effect of the use of PES in electric networks is obtained only if the schedule of their generation is agreed upon with the total schedule of electricity consumption of the local electrical system. A new method of reconciling the schedules of electrical loads of a local electric system and generation of photovoltaic electric station in it is proposed. The method is based on the definition of consumers, the harmonization of which graphs will allow the maximum use of energy generated by PES with minimal loading of LES nodes. As a result, it reduces network power losses, improves voltage quality and, consequently, improves energy efficiency of the power supply system.

Key words: renewable energy sources, photovoltaic electric station, instability, operation quality, local electric system, harmonization of schedules, reserve capacity, power losses.

АННОТАЦИЯ

Кравчук С.В. Оптимизация мощностей генерации фотовольтаических электростанций в задачах обеспечения балансовой надежности локальных электрических систем. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.14.02 – Электрические станции, сети и системы. – Винницкий национальный технический университет. – Винница, 2017.

Диссертационная работа посвящена повышению балансовой надежности локальных электрических систем за счет определения оптимальной мощности генерирования ФЭС и разработке методов, позволяющих уменьшить нестабильность их генерирования.

Определяя приоритетность решения задач в ЛЭС, отметим балансовую надежность как надежность ЛЭС, когда ее расчетная модель определяется балансом потребления и генерирования электроэнергии с учетом внешнего поступления. От того, какими способами и средствами обеспечивается балансовая надежность, зависит как успешно решаются другие задачи. От баланса активной и реактивной мощности в ЛЭС зависят ее технико-экономические показатели.

В работе показано, что для оценки энергоэффективности электрических сетей, которая включает в себя надежность и экономичность электроснабжения потребителей, целесообразно пользоваться интегральным показателем качества функционирования. Для более основательного оценивания качества функционирования ЛЭС показатель качества усовершенствована за счет определения весовых коэффициентов его составляющих. Данный показатель позволяет определить функциональную готовность по обеспечению надежного и качественного электроснабжения, а также оценить влияние ФЭС на энергоэффективность ЛЭС.

Нестабильность генерирования ФЭС, как и других ВИЭ, является одним из существенных факторов, влияющих на баланс мощности в ЛЭС и, как следствие, на соответствие параметров режима нормативным значением. На основе анализа вероятностных характеристик процессов генерации ВИЭ, в

частности ФЭС, и нагрузки усовершенствован метод определения коэффициента стабильности генерирования ВИЭ. Данный показатель является вероятностью обеспечения потребителей электроэнергией ЛЭС электроэнергией генерирования ВИЭ. На основе такого определенного показателя стабильности предложен метод определения оптимальной мощности резерва по критерию минимума приведенных затрат энергоснабжающей компании. Также показана связь между относительными показателями балансовой надежности и именуемыми, в частности математическим ожиданием недоотпуска электроэнергии в электрических сетях с ВИЭ. С учетом нестабильности процесса генерации ФЭС предложен метод уменьшения неравномерности графика электрических нагрузок ЛЭС. Такой метод помимо уменьшения неравномерности суммарного графика электрических нагрузок ЛЭС позволяет уменьшить потери электроэнергии в сети и минимизировать затраты энергоснабжающих компаний на стимулирование потребителей к смещению графика нагрузки. Уменьшение затрат достигается за счет выбора оптимальных узлов для выравнивания суммарного графика нагрузки ЛЭС.

Ключевые слова: возобновляемые источники энергии, фотовольтаическая электростанция, нестабильность, качество функционирования, локальная электрическая система, согласования графиков, мощность резерва, потери мощности.

Підписано до друку р. Формат $29.7 \times 42 \frac{1}{4}$

Наклад 100 прим. Зам. № 2017-023

Віддруковано в комп'ютерному інформаційно-видавничому центрі

Вінницького національного технічного університету.

м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95. Тел.: 59-87-38

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи

серія ДК № 3516 від 01.07.2009 р