

**РЕФЕРАТ**  
**наукової праці**  
**«Оптимізація функціонування електричних мереж з**  
**фотоелектричними станціями з урахуванням прогнозного генерування**  
**засобами Smart Grid»**

**авторів Кравчука С.В., Малогулко Ю.В., Мірошника О.В.**

Відповідно до Енергетичної стратегії України на період до 2030 року, схваленої розпорядженням Кабінету Міністрів України від 24 липня 2013 року N1071, розвиток енергетики на основі відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) є важливим напрямком, який підвищує рівень енергетичної безпеки, знижує антропогенний вплив на навколишнє середовище та має великий потенціал з забезпечення значного внеску в процес підвищення енергетичної незалежності України. Виходячи з цього, державою прийнято ряд мотиваційних заходів, зокрема «зелений тариф», для залучення інвестицій у ВДЕ. Найшвидші темпи впровадження серед ВДЕ показують джерела, що базуються на перетворенні енергії сонця. Проте, електричні мережі, в силу їх технічного стану та підходів до керування, не готові до зростання кількості та одиничної потужності фотоелектричних станцій (ФЕС). За кордоном добре зарекомендувала себе концепція Smart Grid, впровадження якої поступово відбувається в енергетичному секторі України. Впровадження даної концепції дозволить підвищити енергоефективність електричних мереж, в тому числі і за рахунок збільшення частки генерування фотоелектричних станцій, що сприятиме диверсифікації імпорту енергетичних ресурсів України.

Створені сприятливі фінансові умови, зокрема «зелений тариф» на електроенергію генеровану ВДЕ, призвели до різкого зростання кількості та встановленої потужності нових фотоелектричних станцій. Тому, враховуючи темпи введення в експлуатацію ФЕС, виникає ціла низка задач проектного та експлуатаційного характеру, зокрема, поява джерел генерування поблизу споживачів перетворює електричні мережі з суто централізованим живленням в локальні електричні системи з власним розосередженим генеруванням. Обсяги такого генерування значні і з ними потрібно рахуватись під час керування режимами роботи електричних мереж. Проте, керування ускладнюється двома значними чинниками, по-перше, фотоелектричні станції відносяться до умовно-керованих джерел, генерування яких залежить від зміни погодних умов в місці розташування станції, а також тим, що власники ФЕС та електричних мереж різні особи, це

в свою чергу інколи створює певний конфлікт інтересів. В даний час, згідно закону «Про ринок електричної енергії України» власник фотоелектричної станції зобов'язаний заявити на наступну добу погодинний графік генерування. Таким чином, розроблення методів прогнозування та засобів дотримання заявленого графіка досить важливе для всіх учасників енергоринку. По-друге, в разі дотримання заявленого графіка необхідно також враховувати природну нестабільність генерування ФЕС. Оскільки пік генерування ФЕС припадає на денний провал у графіку навантаження, це збільшує сумарну нерівномірність останнього. Дану проблему можна вирішити шляхом узгодження графіків генерування ФЕС та навантаження. Для цього необхідно створити автоматизовану систему керування (АСК) сумісного використання ФЕС і централізованого живлення від енергосистеми. Розвиток інформаційного забезпечення і функціонування АСК має здійснюватися на основі принципів SMART Grid. В такому випадку будуть покращуватися техніко-економічні показники електричної мережі. Зокрема, це зменшення втрат електроенергії, покращення якості електроенергії, підвищення балансової надійності. Для цього на етапі проектування повинна визначатися оптимальна потужність ВДЕ і місце їх під'єднання з врахуванням можливого розвитку або реконструкції існуючої електричної мережі.

Проведений систематичний та комплексний аналіз особливостей функціонування фотоелектричних станцій в електричних мережах. Його результати показують, що для використання всіх переваг ФЕС необхідно рахуватись з нестабільністю їх генерування. Таку нестабільність можна врахувати шляхом прогнозування їх графіка генерування або зменшити за рахунок встановлення накопичувача в межах балансової належності підстанції до якої під'єднано ФЕС. Виходячи з цього було розроблено показник, що дозволяє оцінити нестабільність процесу генерування ФЕС. Розроблено метод погодинного прогнозування генерування ФЕС на наступну добу та здійснено його програмну реалізацію. Розроблено метод узгодження графіків генерування ФЕС та навантаження електричної мережі засобами SMART Grid, що дозволяє зменшити сумарну нерівномірність добового графіка навантаження, розвантажити електричну мережу та підвищити її енергоефективність.

**Метою наукової праці** є створення методів та засобів сприяння розбудови фотоелектричних станцій в електричних мережах, впровадження яких забезпечить покращення якості електропостачання споживачів.

У відповідності до поставленої мети основними завданнями роботи є:

- дослідження взаємовпливу режимів ФЕС та споживачів електроенергії на основі аналізу графіків їх функціонування;
- розроблення методу оцінювання стабільності джерел розосередженого генерування;
- розроблення архітектури штучної нейронної мережі глибинного навчання для короткострокового прогнозування сумарного відпуску електроенергії виробниками з відновлювальних джерел енергії;
- розроблення методу прогнозування погодинного виробітку електроенергії фотоелектричними станціями на добу наперед;
- розроблення методу визначення оптимальної потужності резерву для забезпечення балансової надійності локальної електричної системи;
- розроблення методу визначення оптимальної встановленої потужності ФЕС на підставі аналізу якості функціонування електричної мережі;
- розроблення методу узгодження графіків генерування ФЕС та навантаження в електричній мережі;
- оцінювання впливу функціонування ФЕС на релейний захист та протиаварійну автоматику електричних мереж.
- дослідження можливості компенсації реактивної потужності фотоелектричними станціями.
- створення структурної схеми системи автоматичного керування режимами електричних мереж з ФЕС на основі принципів SMART Grid;
- розроблення натурно-імітаційної моделі для дослідження процесу реалізації SMART Grid технологій в електричних мережах з ФЕС.
- виконання алгоритмічної та програмної реалізації розроблених методів та перевірка їх адекватності та ефективності.

### **Характеристика результатів наукової праці.**

Інтенсивне впровадження відновлювальних 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 відновлювальні джерела енергії з нестабільним генеруванням та відсутністю достатнього рівня автоматизації мереж. Наявність в розподільних електричних мережах джерел енергії дозволяє характеризувати їх як локальну електричну систему, від надійної і економічної роботи якої залежить не лише рівень послуг з електропостачання, а й стабільна робота енергосистеми. Важливим при цьому є узгодження графіків навантаження і генерування в ЛЕС таким чином, щоб шляхом балансування потужності в ЛЕС мінімізувати їх вплив на основні центри живлення від електроенергетичної системи (ЕЕС). Особливо тоді, коли в точках

примикання ЛЕС до ЕЕС необхідно витримувати заданий графік споживання (генерування) електроенергії.

Оскільки частка фотоелектричних станцій серед ВДЕ є суттєвою, а генерування їх нестабільне через залежність від природних умов, то актуальним є дослідження їх впливу на режим локальної електричної системи.

Запропоновані методи по прогнозуванню графіка погодинного вироблення електроенергії ФЕС та їх узгодження з навантаженням електричних мереж, лягли в основу програмного забезпечення, що є засобом оптимального керування режимами електричних мереж. Зрозуміло, що розроблені засоби будуть входити в частину програмних засобів SMART Grid, їх використання буде можливе не тільки в Україні, а й за її межами. Оскільки в рамках реалізації даної концепції закордоном окреме місце відводиться прогнозуванню навантаження електричної мережі і генерування, це особливо актуально оскільки графік виробітку ФЕС має імовірнісний характер. Для підвищення точності прогнозу пропонується встановлення датчиків метеопараметрів на лініях електропередачі та підстанціях, такі датчики можна буде використати для уточнення параметрів силового обладнання, що експлуатується. Це в свою чергу підвищить точність та достовірність визначення технічних втрат в ньому.

Проте, для надійного функціонування електричних мереж зі знаним ступенем впровадження ФЕС необхідно мати економічно обґрунтований рівень резервованої потужності. Розроблено метод визначення оптимальної потужності резерву для фотоелектричних станцій в локальній електричній системі за критерієм мінімуму приведених витрат енергопостачальної компанії, що дозволяє компенсувати нестабільність процесу генерування ФЕС і підвищити якість електропостачання. 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.

Використання засобів моніторингу SMART Grid дозволить створити електричну мережу з великою кількістю комунікаційних зв'язків, які дадуть змогу забезпечити економічно вигідний режим для енергопостачальної компанії, забезпечити якісну електроенергію для споживачів та отримати максимум прибутку від продажу електроенергії для енергогенерувальних компаній.

**Наукова новизна** одержаних результатів полягає у тому, що:

- вперше запропоновано метод визначення оптимальної потужності

резерву для фотоелектричних станцій 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 фотоелектричних станцій в ній, що ґрунтується на застосуванні алгоритму транспортної задачі і дозволяє підвищити енергоефективність локальних електричних систем за рахунок зменшення втрат електроенергії в мережі, покращення якості напруги та підвищення надійності електропостачання;

– запропоновано архітектуру штучної нейронної мережі глибинного навчання для короткострокового прогнозування сумарного відпуску електроенергії виробниками з відновлювальних джерел енергії (ВДЕ). В цілому запропонований підхід дозволяє побудувати прогнозні інтервали з ймовірністю потрапляння фактичних значень в межі інтервалу близькою до цільових значень. при цьому забезпечена ефективність прогнозного інтервалу на рівні 0,82 при очікуваних значеннях 0,8;

– на основі аналізу ймовірнісних характеристик графіків генерування фотоелектричних станцій, 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;

– запропоновано метод прогнозування погодинного виробітку електричної енергії фотоелектричними станціями на добу наперед, що ґрунтується на основі оцінювання стану ясності неба та базується на математичному апараті нейронних мереж;

– досліджено вплив окремих метеопараметрів на генерування ФЕС, особливістю даного дослідження є встановлення кореляційних зв'язків різних рівнів хмарності та вихідної потужності генерування ФЕС.

**Практична значимість** роботи полягає в тому, що на підставі результатів виконаних досліджень розв'язана задача підвищення якості електропостачання 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 та прогнозування погодинного графіка генерування на добу наперед, що рекомендується для встановлення на фотоелектричних станціях, дозволили значно зменшити небаланси, що викликані нестабільною природою генерування фотоелектричних станцій.

Розроблено комп'ютерну програму короткострокового прогнозування відпуску електроенергії виробниками з відновлювальними джерелами, яка може використовуватися як окремими виробниками електричної енергії для планування продажу електричної енергії на ринку «на добу наперед», так і гарантованим покупцем для власного прогнозування обсягів відпуску електричної енергії генеруючими одиницями за «зеленим» тарифом виробників за «зеленим» тарифом для кожного розрахункового періоду торгового дня та типу відновлювальних джерел, а також виконання агрегованого прогнозу обсягів відпуску електричної енергії виробників за «зеленим» тарифом з упередженням від 1-ї до 48 годин.

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».

**Інша інформація, яка характеризує роботу.** Загальна кількість публікацій авторів – 141, з них за тематикою роботи – 105 публікацій, серед яких один патент на корисну модель, 6 свідоцтв про реєстрацію авторського права на твір, 4 монографії видані в Україні та 2 закордоном. Загальна кількість посилань на членів авторського колективу наукової праці у пошуковій системі <http://scholar.google.com/> складає 166, h-індекс 12.

В результаті виконання наукової праці захищено 2 кандидатські дисертації.

Отримані результати пройшли апробацію та обговорювалися на 30 міжнародних науково-технічних конференціях в Україні та за її межами.

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

За наведеною тематикою проводиться активна робота закордонних та вітчизняних вчених, що включає на різні аспекти функціонування фотоелектричних станцій в електричних мережах. Аналіз та дослідження останніх науково-технічних розробок показали, що для зменшення втрат електроенергії та покращення показників її якості доцільно переходити до розв'язання комплексної задачі оптимізації схеми електричної мережі, особливо, коли до її складу входить ФЕС. Зазвичай перелічені задачі розв'язуються шляхом декомпозиції на задачі оптимізації функціонування фотовольтаїчних електричних станцій та задачі функціонування електричних мереж. В залежності від поставлених задач кожен із них розв'язують використовуючи один із критеріїв оптимальності, таких як: мінімум втрат електроенергії – в роботах: Walid El-Khattam, Kankar Bhattacharya, Yasser Hegazy and M. M. A. Salama «Optimal Investment Planning for Distributed Generation in a Competitive Electricity Market» та Andrew Keane, Mark O'Malley «Optimal Allocation of Embedded Generation on Distribution Networks», якість електроенергії - N. S. Rau and Y.-H. Wan «Optimum location of resources in distributed planning, IEEE Transactions on Power Systems», надійність електропостачання - Caisheng Wang, M. Hashem Nehrir «An Analytical Method for DG Placements Considering Reliability Improvements», пропускна спроможність - в роботах: Hamid Falaghi, Mahmood-Reza Haghifam «ACO Based Algorithm for Distributed Generation Sources Allocation and Sizing in Distribution Systems», та Víctor H. Méndez Quezada, Juan Rivier Abbad, and Tomás Gómez San Román «Assessment of Energy Distribution Losses for Increasing Penetration of Distributed Generation», швидкість відновлення напруги - Andrew Keane, Luis (Nando) F. Ochoa, Eknath Vittal, Chris J. Dent, Gareth P. Harrison «Enhanced Utilization of Voltage Control Resources With Distributed Generation», максимум видачі потужності - Nikhil K. Ardesna, Badrul H. Chowdhury «Supporting Islanded Microgrid Operations in the Presence of Intermittent Wind Generation», максимум прибутку - C. L. T. Borges, and D. M. Falcao «Optimal distributed generation allocation for reliability, losses, and voltage improvement», мінімум інвестицій - Y. Alinejad-Beromi, M. Sedighzadeh, M. Sadighi «A Particle Swarm Optimization for Siting and Sizing of Distributed Generation in Distribution Network to Improve Voltage Profile and Reduce THD and Losses» тощо.

Це передбачає реалізацію ефективних проектних рішень та впровадження систем оперативної реконфігурації схем приєднання розосереджених джерел енергії засобами Smart Grid, зокрема у роботі Ali Ahmadian, Mahdi Sedghi, Masoud Aliakbar-Golkar, «Fuzzy Load Modeling of Plug-in Electric Vehicles for

Optimal Storage and DG Planning in Active Distribution Network». Наприклад, у статті авторів J. Junga, A. Onena, R. Arghandeha, R. Broadwatera «Coordinated control of automated devices and photovoltaic generators for voltage rise mitigation in power distribution circuits» обґрунтовують необхідність координованого керування автоматизованими пристроями і фотоелектричними генераторами для зменшення негативного впливу наслідків підвищення напруги в колах електричних мереж джерелами ВДЕ.

У роботі авторів Hua Han, Xiaochao Hou, Jian Yang, Jifa Wu «Review of Power Sharing Control Strategies for Islanding Operation of AC Microgrids» досліджуються питання автономної роботи РЕМ у напрямках симетричного розподілу навантаження між паралельно працюючими інверторами та дотримання вимог якості електроенергії. Автори Li Shengqi, Zeng Lili, Li Yongan «Optimal Reactive Power Planning of Radial Distribution Systems with Distributed Generation» досить розгорнуто описали в своїй роботі питання оптимізації впливу частки розосередженого генерування у балансі реактивної потужності електричної мережі фотовольтаїчними електростанціями. В статті авторів Кириленка О.В., Павловського В.В., Лук'яненка Л.М., Трача І.В. «Проблеми інтеграції відновлюваних джерел електроенергії в «слабкі» електричні мережі» показано, що неузгодженість режимів роботи може призвести до надлишкових втрат, оскільки конфігурація мережі залежить від вибору режимів окремих генераторів, що дає змогу зменшити втрати електроенергії в системі. Монографія «Інтелектуальні електричні мережі: елементи та режими», автора Кириленка О.В., присвячена питанням особливостей функціонування ринків електричної енергії та використання відновлювальних джерел енергії. В ній наведено трактування інтелектуалізації електричних мереж як нового етапу розвитку концепції Smart Grid стосовно електроенергетичних систем та мереж зокрема окремих джерел, так і загальні зв'язки за напругою живлення.

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

**Впровадження результатів наукової праці.** Працездатність та ефективність запропонованих у роботі методів, алгоритмів та програмних засобів підтверджена обчислювальними експериментами з оптимізації та керування режимами ЛЕС з відновлюваними джерелами електроенергії. На основі отриманих у роботі умов оптимальності, методів та алгоритмів вдосконалено комплекс програм інтелектуальної підтримки роботи диспетчера ЛЕС, а саме додано метод узгодження графіків генерування фотоелектричних станцій та навантаження локальних електричних систем, який передано для дослідної експлуатації до ПАТ «Вінницяобленерго» (акт



впровадження від 25.03.2019 р.). Результати роботи впроваджено також у навчальний процес Вінницького національного технічного університету (акт впровадження від 02.04.2019 р.).

Система прогнозування графіків генерування фотоелектричних станцій на добу наперед успішно експлуатується в «KNESS R&D Center», про що є відповідний акт впровадження від 28.03.2018 р.

Метод визначання ємності накопичувача для фотоелектричних станцій, на основі визначення їх імовірнісних характеристик, експлуатується в ТОВ «Енергоінвест», про що є відповідний акт впровадження від 04.04.2019 р.

**Обсяги впровадження наукової праці.** Науково-дослідна робота проводилася відповідно до наукового напрямку тематики науково-дослідних робіт ВНТУ та ІЕД за держбюджетними темами «Оптимізація функціонування електричних мереж енергосистем в умовах зростання навантаження споживачів та децентралізації їх живлення» (№ державної реєстрації 0110U002161) та «Засоби оптимізації сумісної роботи локальних електричних систем з відновлюваними джерелами енергії та систем централізованого електропостачання» (№ державної реєстрації 0113U003138), «Інтегрування нетрадиційних та відновлюваних джерел енергії в електричні мережі для підвищення їх енергоефективності з використанням SMART GRID технологій» (№ держреєстрації 018U000206), «Розвиток засобів комп'ютерного моделювання ЕЕС для оперативного та короткострокового прогнозування навантаження та рівня стійкості ОЕС України» (шифр "Система-6", державний реєстраційний номер роботи 0115U005309), «Створення науково-технічних основ інтелектуалізації технологічних процесів та засобів вимірювання, керування, моніторингу і діагностування в електроенергетичних та електротехнічних системах» (шифр: ІНТЕХЕН, державний реєстраційний номер роботи 0118U005367). За госпдоговірними темами «Програмно-апаратний комплекс прогнозування режимів функціонування фотовольтаїчних електричних станцій» (№ договору 2162), також «Розроблення системи прогнозування виробітку електричної енергії фотоелектричними станціями» (№ договору 2163) та «Розроблення рекомендацій щодо підвищення надійності та якості електропостачання філії переробного комплексу і птахо-комплексу при підключені на паралельну роботу СЕС, когенерації та центральної мережі «Вінницяобленерго» (№ договору 2165) автори брали участь у виконанні вищевказаних робіт як виконавці.

## **Економічна ефективність**

За II півріччя 2020 р. середньоквадратична похибка всіх виробників за «зеленим» тарифом, які входять в балансуючу групу ДП «Гарантований покупець», склала 319 МВт·год, що становить 4,2% від встановленої потужності (7500 МВт). Зниження похибки прогнозу на 1% до 3,2% дозволить підвищити встановлену потужність всіх об'єктів ВДЕ до 9800 МВт·год при використанні лише наявних в енергосистемі засобів балансування. Зниження похибки прогнозу може бути забезпечено, або підвищенням якості прогнозів, або застосуванням локальних технічних засобів підвищення балансової надійності, в тому числі систем накопичення енергії.

Отже, наукова праця «Оптимізація функціонування електричних мереж з фотоелектричними станціями з урахуванням прогнозного генерування засобами Smart Grid», в якій вирішено важливу науково-прикладну задачу розробки теоретичних засад та впровадження на практиці математичних моделей та методів формування умов оптимального інтегрування фотоелектричних станцій в електричні мережі засобами Smart Grid за рахунок впровадження системи прогнозування їх генерування. Запропоновані в роботі методи та заходи направлені на покращення сонячних електростанцій у складі ОЕС України в сучасних умовах відповідно до законодавства України та Енергетичного Співтовариства.

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