

# МОДЕЛЮВАННЯ ВІДНОВЛЮВАЛЬНИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ В ЛОКАЛЬНИХ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМАХ

Вінницький національний технічний університет

## *Анотація*

*Роботу присвячено математичному моделюванню відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) у складі локальних електроенергетичних систем (ЛЕС). Розроблено та досліджено математичні моделі окремих видів ВДЕ з урахуванням нелінійних характеристик генерації (кубічна залежність потужності ВЕУ, однодіодна модель ФЕС, гідравлічна модель мікро-ГЕС). Виконано комп'ютерне моделювання режимів ЛЕС та запропоновано рекомендації щодо оптимізації параметрів керування для підвищення стабільності функціонування розподільних мереж.*

**Ключові слова:** моделювання відновлюваних джерел енергії, локальні електроенергетичні системи, вітроенергетичні установки, фотоелектричні системи, малі гідроелектростанції, математичні моделі.

## *Abstract*

*The work is devoted to the mathematical modeling of renewable energy sources (RES) within local electric power systems (LEPS). Mathematical models of specific types of RES have been developed and investigated, taking into account nonlinear generation characteristics (cubic dependence of WTG power, single-diode model of PV systems, and hydraulic model of micro-hydro plants). Computer modeling of LEPS operating modes has been performed, and recommendations for optimizing control parameters have been proposed to enhance the operational stability of distribution networks.*

**Keywords:** renewable energy sources modeling, local electric power systems, wind turbine generators, photovoltaic systems, small hydro power plants, mathematical models.

## Вступ

Сучасний розвиток енергетики України характеризується стрімким переходом до децентралізованих систем генерації на основі відновлюваних джерел енергії (ВДЕ), що зумовлено необхідністю підвищення стійкості й живучості енергосистеми в умовах значних пошкоджень централізованої інфраструктури. В інтегрованих локальних електроенергетичних системах (ЛЕС) залучення сонячних, вітрових і мікро-гідроелектростанцій дозволяє забезпечити локальну автономію споживачів та суттєво знизити втрати на передачу потужності [1]. Однак стохастичний та нестационарний характер генерації ВДЕ, який критично залежить від зміни метеорологічних чинників, створює суттєві ризики для стабільності рівнів напруги й частоти в розподільних мережах. Це зумовлює необхідність розробки й практичного застосування уточнених математичних моделей для комплексного аналізу, прогнозування та оптимізації режимів роботи таких децентралізованих систем [1].

Метою дослідження є удосконалення методів математичного моделювання відновлюваних джерел енергії для підвищення надійності, ефективності та стабільності функціонування локальних електроенергетичних систем.

## Результати дослідження

Для комплексної оцінки динамічної взаємодії відновлюваних джерел енергії у складі локальних енергосистем було розроблено цифрові симуляційні моделі в середовищі MATLAB/Simulink. Особливу увагу приділено аналізу перехідних процесів малого гідроагрегату потужністю 3 кВА, який виконує роль базового джерела для підтримання балансу в автономній мережі [3].

Моделювання динамічних режимів мікро-ГЕС підтвердило, що стійкість системи критично залежить від параметрів гідравлічного контуру та налаштувань автоматичного регулятора частоти обертання. Завдяки оптимізації коефіцієнтів ПД-регулятора ( $k_1=0,613$ ,  $k_i=0,104$ ,  $k_d=0,0002$ ), вдалося досягти швидкого затухання коливань водяного стовпа в напірному трубопроводі. Час первинного виходу генера-

тора на синхронну швидкість склав 17 секунд, а повне стабілізування параметрів перехідного процесу завершилося на 40-й секунді, забезпечивши утримання фазної напруги статора на рівні 231 В (табл. 1). Це доводить ефективність інтеграції гідроагрегатів для компенсації коливань потужності децентралізованих джерел [1, 3].

Таблиця 1- Параметри динамічної симуляції моделі мікро-ГЕС у ЛЕС

Параметр симуляції	Значення	Одиниці виміру
Номинальна потужність генератора	3000	ВА
Коефіцієнти ПД-регулятора ( $k_p, k_i, k_d$ )	0,613 / 0,104 / 0,0002	-
Час виходу на синхронну швидкість	17	с
Загальна тривалість перехідного процесу	40	с
Усталена активна / реактивна потужність	0,6 / 0,261	о.н.
Фазна напруга статора в усталеному режимі	231	В

У межах дослідження також виконано розрахунок усталених режимів розподільної мережі з інтегрованими сонячними електростанціями за методом Ньютона-Рафсона. Було проаналізовано вплив локації СЕС на загальні втрати потужності та якість напруги за допомогою спеціальних критеріїв — індексів втрат (PLI) та відхилень напруги (VDI) [1, 2]. Результати розрахунків (табл. 2) наочно демонструють, що хаотичне підключення фотоелектричних систем у неоптимальних точках призводить до погіршення профілю напруги (до 1,07 о.н.) та збільшення втрат через зустрічні потоки потужності.

Таблиця 2 - Вплив інтеграції СЕС на техніко-економічні показники розподільної мережі

Режим роботи розподільної мережі	Сумарні активні втрати, %	Мінімальна напруга, о.н.	Максимальна напруга, о.н.
Базовий режим (без залучення СЕС)	4,5 – 6,0	0,92–0,95	1,00
Приєднання СЕС в оптимальному вузлі	2,0–3,5	0,95–0,98	1,02–1,04
Приєднання СЕС у неоптимальному вузлі	3,5–5,5	0,90–0,94	1,04–1,07
Оптимізований режим із регулюванням Q	1,5–3,0	0,96–0,99	1,01–1,03

Впровадження розробленого алгоритму нелінійного програмування для оптимізації режимів ЛЕС за критерієм мінімуму втрат активної потужності дозволило досягти зниження втрат у лініях електропередачі на 47% порівняно з базовим станом мережі [1]. За рахунок використання інтелектуальних інверторів сонячних модулів з можливістю генерації/споживання реактивної потужності (Q) забезпечено ефективне згладжування пікових відхилень напруги [2]. При цьому коефіцієнт гармонічних спотворень струму (THD<sub>i</sub>) утримувався в межах 2,0–4,0%, що підтверджує високу електромагнітну сумісність обладнання та відповідність міжнародним стандартам якості електроенергії.

### Висновки

На основі виконаного комп'ютерного моделювання та розрахунків усталених режимів доведено, що інтеграція відновлюваних джерел енергії за критеріями оптимального розміщення у вузлах ЛЕС, у поєднанні з оптимізацією регуляторів мікро-ГЕС [3] та залученням інтелектуальних інверторів СЕС до керування реактивною потужністю [2], дозволяє знизити технічні втрати активної потужності в мережі до 47% і забезпечує стійке утримання параметрів частоти та напруги в межах діючих стандартів якості електроенергії [1].

### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Оптимізація режимів електричних мереж з відновлюваними джерелами електроенергії : монографія / П. Д. Лежнюк, О. Є. Рубаненко, І. О. Гунько. — Вінниця : ВНТУ, 2017. — 164 с. <https://press.vntu.edu.ua/index.php/vntu/catalog/download/366/747/845-1?inline=1>

2. Відновлювані джерела енергії в розподільних електричних мережах : монографія / П. Д. Лежнюк, О. А. Ковальчук, О. В. Нікіторович, В. В. Кулик. — Вінниця : ВНТУ, 2014. — 204 с.  
<https://press.vntu.edu.ua/index.php/vntu/catalog/download/117/203/231-1?inline=1>

3. Мала гідроенергетика України. Том 2. Технологічні особливості малих ГЕС : Аналітичний огляд / Інститут проблем екології та енергозбереження. — Київ, 2018. — 55 с.  
<https://elar.khmnu.edu.ua/server/api/core/bitstreams/8ebefe70-7b28-44a4-9e09-ef967a3a167c/content>

*Заводнюк Олексій Святославович – студент, факультет електроенергетики та електромеханіки, група 2ЕС-22б, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: [ozavodnyuk@gmail.com](mailto:ozavodnyuk@gmail.com)*

*Науковий керівник: Комар Вячеслав Олександрович – докт. техн. наук, професор, завідувач кафедри електричних станцій та систем, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця.*

**Zavodniuk Oleksii S.** – student, Faculty of Electrical Power Engineering and Electromechanics, group 2ES226, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: [ozavodnyuk@gmail.com](mailto:ozavodnyuk@gmail.com)

Supervisor: **Viacheslav Komar** - D. Sc. (Eng.), Professor, Head of the department of electric power stations and systems, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia.