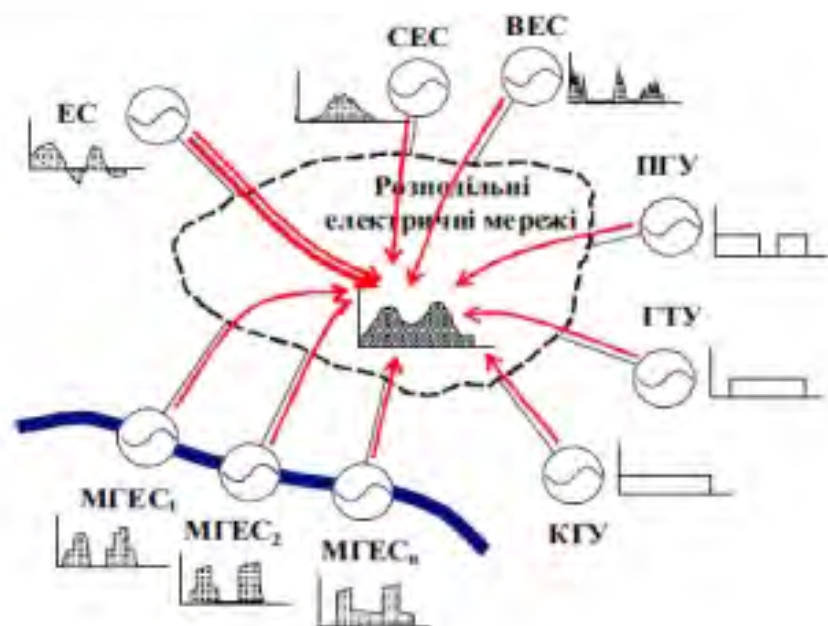


П. Д. Лежнюк, О. А. Ковальчук, О. В. Нікіторович, В. В. Кулик

## ВІДНОВЛЮВАНІ ДЖЕРЕЛА ЕНЕРГІЇ В РОЗПОДІЛЬНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ



Міністерство освіти і науки України  
Вінницький національний технічний університет

**П. Д. Лежнюк, О. А. Ковальчук, О. В. Нікіторович, В. В. Кулик**

**ВІДНОВЛЮВАНІ ДЖЕРЕЛА ЕНЕРГІЇ  
В РОЗПОДІЛЬНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ**

**Монографія**

Вінниця  
ВНТУ  
2014

УДК 621.311.24+621.311.1

ББК 31.272

В42

Рецензенти:

**С. Ф. Артюх**, доктор технічних наук, професор

**В. М. Кутін**, доктор технічних наук, професор

Рекомендовано до друку Вченою радою Вінницького національного технічного університету Міністерства освіти і науки України (протокол № 6 від 30.01.2014 р.)

**В42 Відновлювані джерела енергії в розподільних електричних мережах** : монографія / П. Д. Лежнюк, О. А. Ковальчук, О. В. Нікіторович, В. В. Кулик. – Вінниця : Вінниця : ВНТУ, 2014. — 204 с.

ISBN 978-966-641-577-9

В монографії розглядається проблема підвищення ефективності сумісного функціонування різнотипних відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) в електромережах за рахунок оптимізації схем їх приєднання, а також автоматизації частини функцій керування, а саме оптимального керування режимами ВДЕ з урахуванням особливостей перетворення ними первинної енергії та електричних зв'язків. Монографія розрахована на фахівців в галузі математичного моделювання та оптимізації роботи відновлюваних джерел енергії в розподільних електричних мережах, а також може бути корисною студентам і аспірантам відповідного спрямування.

УДК 621.311.24+621.311.1

ББК 31.272

**ISBN 978-966-641-577-9**

© П. Лежнюк, О. Ковальчук, О. Нікіторович, В. Кулик, 2014

## ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	7
ВСТУП.....	8
1 ПРОБЛЕМИ ОПТИМІЗАЦІЇ РЕЖИМІВ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ З ВІДНОВЛЮВАНИМИ ДЖЕРЕЛАМИ ЕНЕРГІЇ .....	13
1.1 Особливості експлуатації розподільних електромереж в умовах ринку електроенергії та адресного електропостачання .....	13
1.1.1 Загальна оцінка впливу відновлюваних джерел електроенергії на роботу розподільних електричних мереж .....	13
1.1.2 Вплив ВДЕ на втрати потужності та електроенергії в розподільних мережах.....	16
1.2 Характеристика відновлюваних джерел електроенергії, як об'єкта керування.....	20
1.3 Сумісна робота різнотипних ВДЕ в локальній електричній системі.....	25
Висновки до розділу 1.....	28
2 ОСОБЛИВОСТІ РОБОТИ ВІДНОВЛЮВАНИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ В РОЗПОДІЛЬНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ СХЕМ ЇХ ПРИСДНАННЯ .....	29
2.1 Взаємовплив відновлюваних джерел енергії та розподільних електричних мереж .....	29
2.1.1 Аналіз впливу ВДЕ на режими роботи ЕМ.....	30
2.1.2 Визначення складових втрат потужності, зумовлених функціонуванням ВДЕ в електромережах .....	35
2.2 Алгоритми розрахунку складової втрат потужності в розподільних мережах від впливу розосередженого генерування ..	38
2.2.1 Розрахунок транзитних та адресних втрат потужності ВДЕ у розімкнених електричних мережах 10(6) кВ.....	38
2.2.2 Розрахунок транзитних та адресних втрат потужності ВДЕ в розподільних мережах довільної конфігурації.....	39
2.3 Оптимізація схеми приєднання ВДЕ до розподільних електричних мереж .....	44
2.3.1 Визначення сукупності потенційних місць приєднання ВДЕ до розподільних електричних мереж.....	45
2.3.2 Визначення місць приєднання ВДЕ до електричних мереж на підставі аналізу чутливості .....	51
Висновки до розділу 2.....	54

<b>3 ОСОБЛИВОСТІ ВИКОРИСТАННЯ АСИНХРОННИХ ГЕНЕРАТОРІВ НА МАЛИХ ГЕС В ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ ЕНЕРГОСИСТЕМ</b> .....	56
3.1 Стан та загальна характеристика проблеми.....	56
3.2 Аналіз досвіду застосування асинхронних генераторів для потреб малої гідроенергетики .....	57
3.3 Формування критерію оптимальності в задачах проектування електричної частини малих ГЕС .....	61
3.3.1 Рентабельність капіталовкладень як критерій оптимальності.....	61
3.3.2 Визначення складових критерію оптимальності .....	62
3.3.2.1 Видатки, що пов'язані з капітальними затратами.....	62
3.3.2.2 Техніко-економічна оцінка споживання реактивної потужності асинхронними генераторами .....	64
3.3.2.3 Видатки на компенсацію недовідпущеної (втраченої) електроенергії .....	69
3.3.2.4 Видатки на ремонт та обслуговування .....	73
3.4 Визначення граничної потужності ефективного використання асинхронних генераторів, аналіз та оцінювання її чутливості .....	74
3.5. Вибір асинхронних машин та забезпечення ефективності їх експлуатації у генераторному режимі.....	77
Висновки до розділу 3.....	79
<b>4 МОДЕЛЮВАННЯ ОПТИМАЛЬНИХ СТАНІВ КОМПЛЕКСУ ВІДНОВЛЮВАНИХ ДЖЕРЕЛ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ У РОЗПОДІЛЬНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ</b> .....	80
4.1 Умови оптимальності функціонування комплексу ВДЕ на прикладі каскадів малих ГЕС .....	81
4.1.1 Загальні умови роботи каскаду малих ГЕС .....	81
4.1.2 Формування умов оптимального функціонування каскадів малих ГЕС без урахування електричних зв'язків.....	83
4.1.3 Формування умов оптимальності режимів каскаду малих ГЕС з урахуванням електричних зв'язків .....	86
4.2 Задачі оптимального керування режимами комплексів різномісних ВДЕ в розподільних електричних мережах.....	92
4.2.1 Задачі і математичні моделі оптимізації режимів ВДЕ .....	92
4.2.2 Формування умов оптимальності режимів комплексу ВДЕ для отримання максимального прибутку від їх експлуатації в електромережах .....	95

4.2.3 Формування умов оптимальності режимів ВДЕ за критерієм мінімального впливу локальної електричної системи на основний центр живлення .....	100
4.2.4 Формування умов оптимальності режимів ВДЕ за критерієм мінімального відхилення від заданого графіка видачі потужності .....	103
4.2.5 Особливості реалізації отриманих умов оптимальності функціонування ВДЕ, режими яких є взаємозалежними за первинним енергоносієм .....	106
Висновки до розділу 4 .....	107
<b>5 КОМПЛЕКСНА АВТОМАТИЗАЦІЯ ОПТИМАЛЬНОГО КЕРУВАННЯ ВДЕ В ЕЛЕКТРИЧНИХ СИСТЕМАХ НА ПІДСТАВІ КРИТЕРІАЛЬНОГО МОДЕЛЮВАННЯ .....</b>	<b>108</b>
5.1. Критеріальна модель якості функціонування керованих джерел енергії у комплексі різнотипних ВДЕ .....	108
5.2. Математичне моделювання якості функціонування локальних електричних систем .....	113
5.2.1 Розподільна електрична мережа як локальна електрична система та моделювання її з використанням теорії марковських процесів .....	113
5.2.2 Моделювання вартісної характеристики якості функціонування локальної електричної системи .....	118
5.2.3 Перевірка адекватності вартісної моделі якості функціонування ЛЕС. Граничні стани системи .....	121
5.3. Оперативне прогнозування режимів роботи ВДЕ на прикладі малих ГЕС .....	124
5.4 Комплексна автоматизація процесу функціонування ВДЕ у розподільних електричних мережах .....	129
5.4.1 Функціонування малих ГЕС у народногосподарському комплексі .....	130
5.4.2 Особливості відновлюваних джерел електроенергії, як об'єкта керування .....	132
5.4.3 Ієрархічна структура керування комплексом ВДЕ .....	133
5.4.4 Структура автоматизованої системи керування ВДЕ в розподільних електромережах та послідовність її реалізації ....	136
5.4.5 Практична реалізація автоматизованої системи керування ВДЕ в електричних мережах .....	137
Висновки до розділу 5 .....	142

6 АНАЛІЗ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ ВПЛИВУ ВІДНОВЛЮВАНИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ НА РЕЖИМИ РОБОТИ ЕЛЕКТРОМЕРЕЖ.....	143
6.1 Вплив відновлюваних джерел енергії на втрати електроенергії в електричних мережах.....	144
6.1.1 Втрати електроенергії в електричних мережах з відновлюваними джерелами енергії.....	144
6.1.2 Вплив режимів генерування ВДЕ на режими електромереж за реактивною потужністю.....	147
6.1.3 Вплив генерування ВДЕ на режими електромереж за умови значного перевищення ним суміжного електроспоживання.....	151
6.2. Визначення втрат потужності та електроенергії від адресних перетікань.....	152
6.2.1 Визначення втрат потужності від адресних перетікань для ВДЕ з асинхронними генераторами.....	154
6.2.2 Втрати потужності від адресних перетікань для ВДЕ з синхронними генераторами.....	159
6.3. Визначення оптимальної схеми приєднання відновлюваних джерел енергії до електричних мереж.....	163
6.3.1 Визначення оптимальних вузлів приєднання ВДЕ.....	164
6.3.2 Аналіз якості функціонування ВДЕ в електричних мережах.....	168
6.4. Оцінювання взаємовпливу відновлюваних джерел електроенергії в процесі оптимального керування їх режимами в розподільних мережах.....	171
Висновки до розділу 6.....	178
ВИСНОВКИ.....	180
ЛІТЕРАТУРА.....	183
ДОДАТОК А Тенденції розвитку відновлюваної енергетики в Україні та світі.....	194
ДОДАТОК Б Вихідні дані для аналізу впливу малих ГЕС на режими роботи розподільних електричних мереж.....	196
ДОДАТОК В Результати розрахунків з дослідження впливу Слобода-Бушанської ГЕС на режими ЕМ 10 кВ Ф-45 ПС «Михайлівка».....	197
ДОДАТОК Д Результати розрахунків з дослідження впливу Слобода-Бушанської СЕС на режими ЕМ 10 кВ Ф-45 ПС «Михайлівка».....	202

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

АГ	– асинхронний генератор
АСК	– автоматизована система керування
БД	– база даних
ВГС	– водогосподарська система
ВЕС	– вітрова електрична станція
ВДЕ	– відновлювані джерела енергії
ГЕС	– гідроелектрична станція
ГТУ	– газотурбінні установки
е. р. с.	– електрорушійна сила
ЕЕС	– електроенергетична система
ЕС	– електрична система
ЕМ	– електричні мережі
КГУ	– когенераційні установки
КУ	– конденсаторні установки
ЛЕП	– лінія електропередачі
ЛЕС	– локальна електрична система
МГЕС	– мала гідроелектростанція
ПГУ	– парогазові установки
ПК	– програмний комплекс
РЕМ	– розподільні електричні мережі
РП	– регулювальний пристрій
САК	– система автоматичного керування
СГ	– синхронний генератор
СЕС	– сонячна електрична станція (фотовольтаїчна)



## ВСТУП

В умовах постійного зростання дефіциту та підвищення вартості енергоресурсів використання відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) є одним з напрямків забезпечення екологічної та енергетичної безпеки України [1–3]. Функціонування їх в електроенергетичних системах (ЕЕС), за певних умов, може забезпечити суттєву економію енергоресурсів. Економія досягається в результаті використання відновлюваних джерел первинної енергії та децентралізації вироблення електроенергії і, як наслідок, зменшення витрат на її транспортування та розподіл [4–8].

В останні десятиліття у світі спостерігається стійке зацікавлення проблемами використання ВДЕ [2, 5, 8], особливо у контексті їх роботи в електричних мережах (ЕМ) енергосистем. Це викликано бажанням знизити негативний вплив енергетичної галузі на навколишнє середовище, однак, без погіршення показників якості електричної енергії та ефективності електропостачання споживачів.

В енергобалансі всіх розвинених країн світу зростає частка відновлювальних джерел електроенергії (ВДЕ). Так, в країнах Євросоюзу розглядається можливість доведення цієї частки в 2020 р. до 20% [2–7] та Додаток А. Найбільш перспективними напрямками вважається розбудова сонячних електростанцій (СЕС) прямого та непрямого перетворення, вітрових (ВЕС), а також малих гідроелектростанцій (МГЕС).

Для України проблема розбудови та експлуатації ВДЕ не є новою. Так, у повоєнні роки спостерігався пік будівництва МГЕС. До кінця 50-х років у країні експлуатувалося 956 станцій на малих річках [3, 9]. Однак, зростання енергоємності промислового виробництва в умовах практичної відсутності екологічних вимог і штучного заниження вартості первинних енергоносіїв, призвело до концентрації виробництва електроенергії на великих теплових, гідравлічних (ГЕС), а також атомних електростанціях. Як наслідок – повний занепад малої гідроенергетики [1, 7], а також практичне припинення досліджень відновлюваної енергетики.

Останнім часом під впливом об'єктивних факторів ситуація в цьому напрямку суттєво змінилася [10–12]. На різних рівнях виявляється розуміння необхідності розбудови ВДЕ в Україні. Протягом 2008–2012 років Верховною радою України були внесені зміни до закону «Про електроенергетику» щодо стимулювання використання альтернативних джерел енергії до 1 січня 2030 року, якими введено поняття «зеленого» тарифу, встановлено перелік альтернативних джерел енергії за «зеленим» тарифом, значення «зеленого» тарифу для різних джерел енергії, мінімальний розмір питомої ваги матеріалів та сировини вітчизняного походження у будівництві ВДЕ тощо.

Відсутність рекомендацій щодо вибору способу приєднання до електричних мереж, структури, конструктивних та експлуатаційних параметрів основного обладнання ВДЕ, здатних забезпечити їх максимальну техніко-економічну ефективність [13, 14], не дозволяє ухвалювати обґрунтовані проектні рішення під час їх розбудови. Однак, існує достатньо багатий досвід європейських країн [4, 5, 15], спираючись на який здійснюється спорудження та експлуатації відновлюваних джерел енергії в Україні.

Так, наприклад, у низці країн для перетворення енергії в галузі відновлюваної енергетики знайшли широке застосування асинхронні генератори (АГ) змінного струму [4, 5, 15–19]. Досвід показує, що для ВЕС та ГЕС з малими встановленими потужностями такі машини мають істотні переваги порівняно з синхронними. Це пов'язано, у першу чергу, з низькою вартістю, простотою конструкції та експлуатації у нормальних режимах, стійкістю до зовнішніх аварій, значним ресурсом. Вказані переваги знайшли практичне підтвердження під час експлуатації ряду МГЕС з асинхронними генераторами на території України. Але ці генератори мають низку недоліків: неможливість регулювання напруги та споживання реактивної потужності, виникнення коливань активної потужності при певних ковзаннях ротора, накиди реактивної потужності під час пуску агрегату [20–22]. Для компенсації впливу зазначених факторів необхідно на етапі формування технічних умов закладати в проект додаткове обладнання, що збільшує кошторисну вартість ВДЕ.

Не зважаючи на зазначені проблеми, на сьогодні намітився і реалізується на практиці поступовий перехід від суто централізованої моделі електропостачання споживачів, основою якої є потужні ТЕС і АЕС, до комбінованої, коли частина електроенергії виробляється відновлюваними джерелами. Вони, працюючи безпосередньо у розподільних електричних мережах, можуть розвантажувати магістральні мережі, підвищуючи їх транспортний потенціал та ефективність експлуатації ЕЕС в цілому.

Однак крім переваг є й недоліки. Так, можуть виникати ускладнення функціонування електричних мереж у разі зростання встановлених потужностей приєднаних відновлюваних джерел електроенергії. Слід зазначити, що аналогічні ускладнення виникають у разі неузгодженого приєднання до ЕМ нетрадиційних джерел електроенергії (когенераційні, газотурбінні та парогазові установки) відносно невеликої потужності.

Оскільки електричні мережі проектувалися для умов централізованого електропостачання, то розбудова в них ВДЕ породжує нові нехарактерні для минулого періоду проблеми і задачі [23, 12]. В першу чергу, впливає нестабільність генерування ВДЕ через природну залежність від стану навколишнього середовища. Звідси виникає необхідність вдосконалення систем релейного захисту та автоматики з метою узгодження електропостачання від ВДЕ та живильних підстанцій електроенергетичної системи.

Слід враховувати також, що одночасно з розбудовою ВДЕ змінюються економічні умови функціонування електроенергетичної галузі. Зокрема відбувається перехід від оптового ринку електроенергії єдиного покупця до балансуючого ринку електроенергії та електропостачання за двосторонніми угодами.

З погляду на складність та особливості функціонування комплексів різнотипних ВДЕ в електроенергетичній системі, очевидно, що визначення та своєчасна реалізація керувальних впливів для забезпечення ефективних режимів їх сумісної роботи у відповідності зі змінами зовнішніх впливів можливі лише за допомогою автоматизованих систем керування (АСК) [24–27].

Виходячи з цього, можна виділити низку важливих технічних аспектів розбудови відновлюваної енергетики, які на сьогодні є недостатньо дослідженими:

- вплив ВДЕ на структурну, балансову та функціональну надійність електроенергетичних систем та використання відновлюваних джерел з метою підвищення надійності та якості електропостачання споживачів;

- особливості функціонування ЕМ в умовах поступової децентралізації електропостачання, виявлення проблем експлуатації ВДЕ в електромережах та узгодження інтересів експлуатуючих організацій;

- сумісна експлуатація комплексів різнотипних відновлюваних джерел енергії та забезпечення ефективності їх роботи за рахунок оптимізації режимів керованих ВДЕ;

- розроблення методів формування законів оптимального керування розосередженими джерелами енергії з метою підвищення ефективності їх сумісної роботи в ЕМ за енергетичним критерієм;

- особливості використання для перетворення енергії відновлюваних джерел різнотипного генераторного обладнання, в тому числі, асинхронних генераторів;

- особливості експлуатації електричних мереж з ВДЕ, регулювання напруги та оптимізація перетікань реактивної потужності в таких мережах;

- вплив ВДЕ на режими роботи розподільних електричних мереж, аналіз та оптимізація складової втрат електроенергії від адресних перетікань, що зумовлені роботою відновлюваних джерел;

- формування ефективних схем приєднання відновлюваних джерел електроенергії до ЕМ із сумірною сукупною потужністю навантаження;

- автоматизація керування комплексами різнотипних ВДЕ в електромережах з використанням технології *SMART Grid* для забезпечення їх ефективної сумісної роботи у планових режимах в контексті підвищення якості функціонування розподільних електричних мереж;

- вдосконалення методів і засобів контролю поточного стану та діагностування основного обладнання відновлюваних джерел енергії.

Визначення оптимальних конструктивних та експлуатаційних параметрів ВДЕ може здійснюватися за допомогою різноманітних методів. Але найбільш адекватне розв'язання цієї задачі забезпечують методи та підходи, які дозволяють отримати стійкі функціональні зв'язки між контрольованими параметрами та параметрами керування на базі фізичних процесів перетворення енергії, а також передачі та розподілу електроенергії в ЕЕС [25–28].

Такі узагальнення можуть бути ефективно отримані з використанням математичних моделей, побудованих на засадах теорії подібності [29, 30]. Використання цих закономірностей дозволяє значно спростити структуру та технічне забезпечення автоматизованої системи керування, а зменшення інформаційної та функціональної навантаженості АСК забезпечує додаткові передумови для аналізу ситуації та керування комплексом ВДЕ в темпі процесу.

Досвід розроблення та експлуатації АСК відновлюваними джерелами енергії, особливо малими ГЕС [6, 7], підтверджує, що задачі автоматизації оптимального керування необхідно розв'язувати, виходячи з системного підходу. Застосування програмованих мікропроцесорних систем спрощує створення технічного забезпечення автоматизованих систем керування [31], оскільки вони надають можливість розвивати діючі системи керування і доповнювати їх необхідними функціональними задачами.

Метою нашої роботи є підвищення техніко-економічної ефективності сумісної експлуатації різнотипних відновлюваних джерел енергії у електричних мережах електроенергетичних систем за рахунок оптимізації схем їх приєднання, а також автоматизації керування режимами їх роботи.

# **1 ПРОБЛЕМИ ОПТИМІЗАЦІЇ РЕЖИМІВ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ З ВІДНОВЛЮВАНИМИ ДЖЕРЕЛАМИ ЕНЕРГІЇ**

## **1.1 Особливості експлуатації розподільних електромереж в умовах ринку електроенергії та адресного електропостачання**

### **1.1.1 Загальна оцінка впливу відновлюваних джерел електроенергії на роботу розподільних електричних мереж**

В руслі переходу від оптового ринку електроенергії єдиного покупця до балансуючого і до електропостачання за двосторонніми договорами в останні роки спостерігається тенденція переходу від чисто централізованого електропостачання до комбінованого, коли зростає кількість місцевих джерел електроенергії. Причому частка останніх в енергобалансі енергосистем зростає. До місцевих джерел електроенергії, що працюють безпосередньо в мережах 10–6–0,38 кВ, відносяться як традиційні джерела невеликої потужності, так і альтернативні. Як альтернатива традиційним розвиваються ВДЕ, когенераційні установки, газо- та парогазові установки та ін.

Разом з тим ЕМ енергосистем проектувалися і споруджувалися за умов централізованого електропостачання, коли електроенергія від крупних теплових і атомних електростанцій трансформуючись передавалась до споживачів (рис. 1.1). Для розподільних електричних мереж (РЕМ) 6–10 кВ, які проектувалися і експлуатуються за розімкненими схемами, це означає що лінії електропередачі працюють в режимі з одностороннім живленням, а трансформатори є понижувальними. Відповідно до цього в РЕМ вибиралися комутаційні апарати, засоби релейного захисту і автоматики, встановлювалися системи обліку електроенергії тощо. Стосовно до вимог надійності електропостачання споживачів та їх характеристик, вибиралась схема РЕМ та виконувалися пункти секціонування, що відповідно формувало потоки потужності в мережі і РЕМ характеризувалися певним значенням втрат електроенергії і рівнем напруг.

З розбудовою в розподільних електричних мережах ВДЕ (рис. 1.2) виникають нові задачі. Це необхідність оптимізації комбінованого електропостачання від ЕЕС і розосередженого генерування, узгодження покриття графіка навантаження відновлюваними джерелами,

які через фізичні особливості можуть видавати потужність за різними графіками оцінювання впливу ВДЕ на значення струмів короткого замикання і, відповідно, на роботу релейного захисту та автоматики, оцінювання впливу на техніко-економічні показники РЕМ тощо.

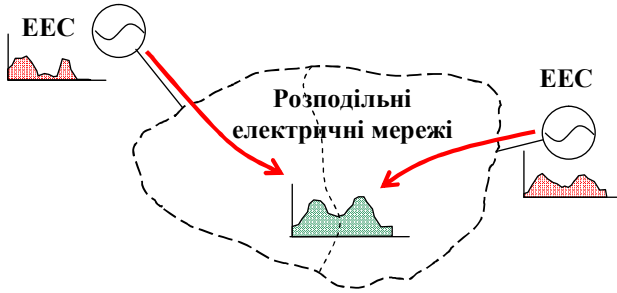


Рисунок 1.1 – Розподільні електричні мережі з централізованим живленням

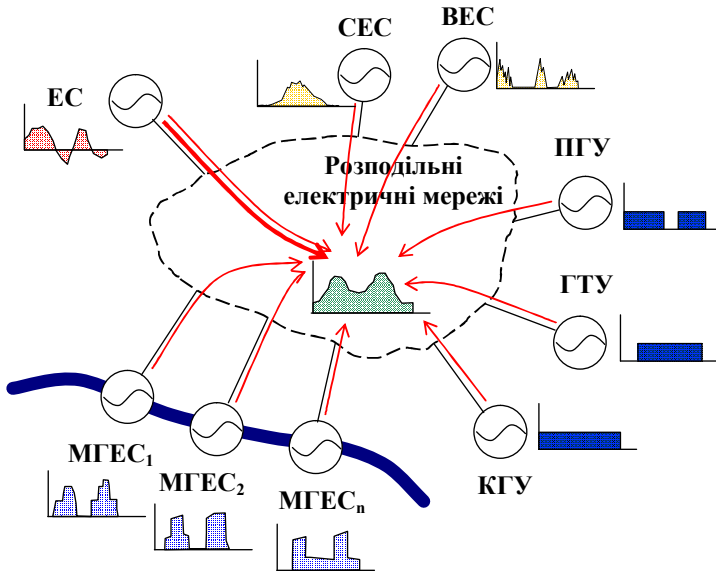


Рисунок 1.2 – Розподільні електричні мережі з комбінованим електропостачанням

Вплив ВДЕ на режими РЕМ суттєво залежить від значення сумарного розосередженого генерування в ній, від одичної встановленої потужності ВДЕ та їх типу, а також від їх місця під'єднання в електричній мережі (це можуть бути шини нижчої напруги підстанцій або відгалуження ліній електропередачі).

Крім того слід враховувати, що одночасно змінюються економічні умови функціонування електроенергетики як галузі, зокрема змінюється модель оптового ринку [32, 33]. У випадку реалізації електропостачання за двосторонніми договорами за участі ВДЕ, коли останні видають потужність в електричну мережу, постає необхідність узгодження їх роботи з енергосистемою, від якої здійснюється централізоване живлення. Це стає обов'язковим, коли встановлена потужність ВДЕ в ЕМ складає вагомую частку від її сумарного навантаження (наприклад, 20 % і більше). В цьому випадку РЕМ можна і доцільно розглядати як локальну електричну систему (ЛЕС), в якій окрім зазначених вище задач постають задачі дослідження статичної і динамічної стійкості ВДЕ та інші, характерні для електричної системи [34, 35].

Серед комплексу задач, що виникають в процесі впровадження ВДЕ, доцільно вивчати і розв'язувати в першу чергу ті, які безпосередньо впливають на масштаби й інтенсивність розбудови альтернативних джерел енергії, зокрема ВДЕ, та правильне розв'язання яких зможе сформуваи, наряду з «зеленими тарифами», стійку мотивацію у інвесторів та енергопостачальних компаній щодо розбудови ВДЕ в Україні.

Такою задачею, зокрема, є задача отримання максимального прибутку від експлуатації ВДЕ для їх розбудови за умови зменшення втрат електроенергії та покращення її якості в РЕМ, а також підвищення надійності електропостачання [23, 36]. При цьому, враховуючи, що електроенергія від ВДЕ передається лініями РЕМ одночасно з електроенергією інших джерел, то необхідно виділяти з сумарних втрат електроенергії ту частку, яка стосується транзиту від ВДЕ. Отже потрібно розробити методику визначення втрат електроенергії від транзитних протікань. Це особливо важливо в умовах, коли здійснюється адресне електропостачання і втрати від транзиту електроенергії повинні покриватися договірними сторонами [33, 37].



Показано [36, 38], що вплив ВДЕ на режими РЕМ, зокрема на втрати потужності та рівні напруги, залежить від багатьох чинників, які проявляються в залежності від умов експлуатації по різному.

### **1.1.2 Вплив ВДЕ на втрати потужності та електроенергії в розподільних мережах**

На сьогодні втрати електроенергії в електричних мережах енергопостачальних компаній України складають 11,5–12,1 % від її відпуску в електричну мережу, що значно більше ніж в США (6,5 %), Англії (8,6 %), Франції (4,5 %) і навіть в Росії (8,7 %) [38]. Визнано, що розподільні мережі є найбільш проблемним і затратним фактором електропостачання територій [38, 39].

Важливим напрямком впливу на втрати електроенергії у розподільних мережах є ВДЕ. Очевидно, що на значення втрат в ЕМ впливають як параметри ВДЕ, так і схеми їх приєднання, а також обсяг та графік споживання суміжних навантажень. Дослідження та обґрунтування ефективного застосування ВДЕ в електричних мережах розглядається в низці робіт [40 – 43].

На рис. 1.3 наведено можливі схеми приєднання ВДЕ в РЕМ, які суттєво відрізняються впливом на потоки потужності і, відповідно, на втрати потужності і електроенергії в мережі. На рис. 1.3а ВДЕ приєднані до шин підстанції. В цьому випадку трансформатор розвантажується на потужність, яка виробляється ВДЕ, і в результаті зменшуються навантажувальні втрати в трансформаторі. В лініях електропередачі втрати не змінюються. У варіанті, показаному на рис. 1.3б, розвантажуються як трансформатор підстанції, так і частина ЛЕП, що забезпечує додаткове зменшення втрат потужності. Оскільки зменшується потік потужності, то зменшуються також втрати напруги, що сприяє покращенню рівнів напруги на шинах підстанцій 10/0,4 кВ.

Виходячи з типових схем приєднання ВДЕ до розподільних мереж, за певних потужностей генерування вони частково компенсують потоки потужності, що зумовлені навантаженням споживачів, і надходження електроенергії з боку системи зменшується. Разом з цим зменшуються втрати електроенергії в розподільних мережах. В загальному їх можна оцінити як [44]

$$\Delta W = \frac{S_{\text{сист}}^2}{U_{\text{н}}^2} r_{\text{ек}} k_{\text{ф}}^2 T_{\text{п}} = \frac{(P_{\text{нав}} - P_{\text{г}})^2 + (P_{\text{нав}} \operatorname{tg} \varphi_{\text{п}} - P_{\text{г}} \operatorname{tg} \varphi_{\text{г}})^2}{U_{\text{н}}^2} r_{\text{ек}} k_{\text{ф}}^2 T_{\text{п}}, \quad (1.1)$$

де  $S_{\text{сист}}$  – повна потужність, що надходить до шин приєднання ВДЕ з боку системи у режимі середніх навантажень;  $P_{\text{г}}$ ,  $P_{\text{нав}}$  – середні потужності, відповідно, ВДЕ та суміжного навантаження;  $U_{\text{н}}$  – номінальна напруга ЕМ;  $r_{\text{ек}}$  – еквівалентний опір ЕМ, визначений з урахуванням приведення навантажень до  $U_{\text{н}}$ ;  $k_{\text{ф}}$  – коефіцієнт форми графіка навантаження споживачів, суміжних з ВДЕ;  $T_{\text{п}}$  – тривалість звітного періоду.

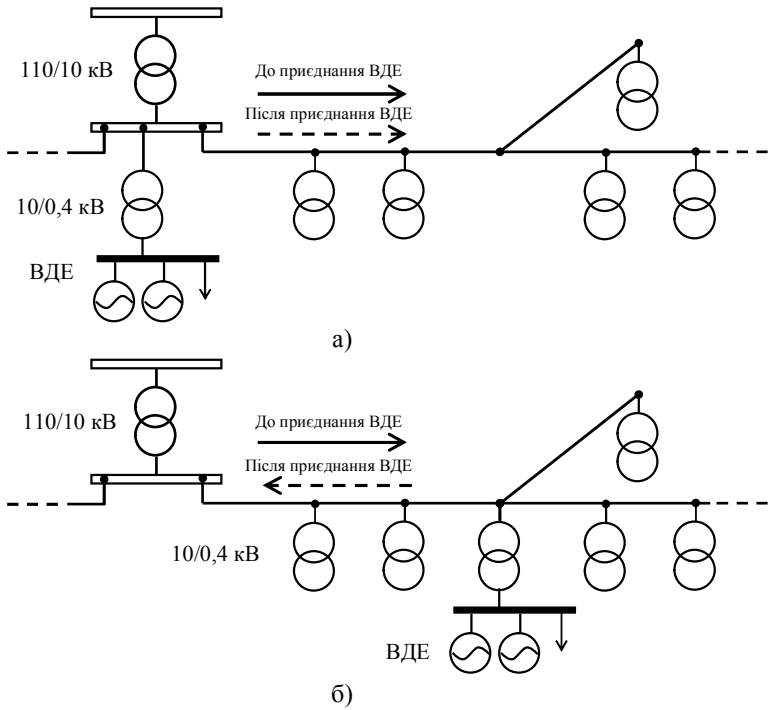


Рисунок 1.3 – Варіанти приєднання ВДЕ в електричній мережі

Вирази для наближеного визначення втрат електроенергії в ЕМ залежно від типу та потужності генераторів ВДЕ мають такий вигляд:

- для випадку застосування синхронних генераторів (СГ)

$$\Delta W_{\text{СТ}} = \frac{P_{\text{Г}}^2(1 + tg^2\varphi_{\text{Г}}) + P_{\text{НАВ}}^2(1 + tg^2\varphi_{\text{Н}})}{U_{\text{Н}}^2} r_{\text{ЕК}} k_{\text{Ф}}^2 T_{\text{Н}} - \frac{2P_{\text{Г}}P_{\text{НАВ}}(1 + tg\varphi_{\text{Г}}tg\varphi_{\text{Н}})}{U_{\text{Н}}^2} r_{\text{ЕК}} k_{\text{Ф}}^2 T_{\text{Н}}; \quad (1.2)$$

– для випадку застосування асинхронних генераторів (АГ)

$$\Delta W_{\text{АГ}} = \frac{P_{\text{Г}}^2 + P_{\text{НАВ}}^2(1 + tg^2\varphi_{\text{Н}}) - 2P_{\text{Г}}P_{\text{НАВ}}}{U_{\text{Н}}^2} r_{\text{ЕК}} k_{\text{Ф}}^2 T_{\text{Н}}. \quad (1.3)$$

З метою оцінювання міри впливу різних типів генераторів ВДЕ на втрати електроенергії в розподільних мережах введено коефіцієнти впливу, що характеризують відношення втрат електроенергії в ЕМ після та перед введенням розосередженого генерування в експлуатацію [44]:

$$k_{\Delta W_{\text{СТ}}} = 1 + \frac{P_{\text{Г}}^2(1 + tg^2\varphi_{\text{Г}})}{P_{\text{НАВ}}^2(1 + tg^2\varphi_{\text{Н}})} - 2 \frac{P_{\text{Г}}(1 + tg\varphi_{\text{Г}}tg\varphi_{\text{Н}})}{P_{\text{НАВ}}(1 + tg^2\varphi_{\text{Н}})} \approx \left( \frac{P_{\text{Г}}}{P_{\text{НАВ}}} - 1 \right)^2; \quad (1.4)$$

$$k_{\Delta W_{\text{АГ}}} = 1 + \frac{P_{\text{Г}}^2}{P_{\text{НАВ}}^2(1 + tg^2\varphi_{\text{Н}})} - 2 \frac{P_{\text{Г}}}{P_{\text{НАВ}}(1 + tg^2\varphi_{\text{Н}})} = \left( \frac{P_{\text{Г}}}{P_{\text{НАВ}}} - 1 \right)^2 \cos^2 \varphi_{\text{Н}} + \sin^2 \varphi_{\text{Н}}. \quad (1.5)$$

З наведених виразів видно, що збільшення втрат в розподільних мережах за рахунок роботи ВДЕ буде мати місце лише у випадку коли середня потужність генерування станцій буде перевищувати аналогічний показник суміжного навантаження вдвічі.

Оцінити вплив джерел енергії на втрати потужності у вітках РЕМ можливо за результатами розрахунків усталених режимів. Проте виділити в цих втратах складову від ВДЕ є проблематично. Складність задачі оцінювання впливу режимів роботи ВДЕ на втрати потужності в РЕМ полягає в тому, що втрати потужності залежать від перетоків у вітках схеми мережі нелінійно і скористатися методом накладання неможливо. В інженерній практиці використовується низка методів,

що дозволяють виконувати розрахунок зазначеної складової втрат як з однозначно заданою інформацією, так і з імовірно-статистичним оцінюванням втрат [45]. Використання цих методів в розімкнених розподільних мережах, як правило, призводить до виникнення похибки, допустимої на етапі планування режимів ЕМ. Однак, у замкнених розподільних ЕМ збільшується вплив нелінійності функції втрат потужності, що може викликати суттєві помилки обчислення додаткових технічних втрат електроенергії у випадку відхилення режиму ЕМ від планового.

В [46] показано, що втрати потужності у вітках ЕМ визначаються як

$$\Delta \dot{\mathbf{S}}_b = \dot{\boldsymbol{\mu}} \dot{\mathbf{S}}, \quad (1.6)$$

де  $\Delta \dot{\mathbf{S}}_b$  – вектор втрат потужності у вітках схеми;  $\dot{\boldsymbol{\mu}}$  – матриця коефіцієнтів розподілу втрат потужності у вітках схеми ЕМ в залежності від потужності у її вузлах  $\dot{\mathbf{S}}$ .

В (1.6) втрати потужності в  $i$ -й вітці визначаються:

$$\Delta \dot{S}_{bi} = \dot{\boldsymbol{\mu}}_i \dot{\mathbf{S}}, \quad (1.7)$$

де  $\dot{\boldsymbol{\mu}}_i = (\dot{\mathbf{U}}_i \mathbf{M}_{\Sigma_i}) \hat{\mathbf{C}}_i \dot{\mathbf{U}}_d^{-1}$ ;  $\dot{\mathbf{U}}_i$ ,  $\hat{\mathbf{U}}_d$  – транспонований вектор та діагональна матриця напруг у вузлах, включаючи і базисний;  $\mathbf{M}_{\Sigma_i}$  – вектор-стовпець матриці з'єднань віток у вузлах включаючи і балансуєчий;  $\hat{\mathbf{C}}_i$  –  $i$ -й вектор-рядок матриці розподілу струмів по вітках схеми.

Вектор-рядок  $\dot{\boldsymbol{\mu}}_i$  складається з коефіцієнтів, які показують, яку частку в сумарних втратах в  $i$ -й вітці складає протікання по ній потужності від кожного вузла, в тому числі і від ВДЕ.

Зауважимо, що коефіцієнти розподілу втрат залежать від параметрів заступної схеми, які за певних допущень можна вважати постійними, а також від значень напруги у вузлах ЕМ, які визначаються навантаженням і генеруванням у вузлах схеми. Таким чином нелінійність залежності втрат потужності в ЕМ від параметрів її режиму враховується. Визначення коефіцієнтів матриці  $\dot{\boldsymbol{\mu}}$  через поточні значення вузлових напруг по суті означає лінеаризацію режиму електричної мережі при зафіксованих потужностях у вузлах.

Таким чином, для випадку, коли зміна потужностей у вузлах ЕМ є незначною, тобто не викликає істотних (не більше 1 %) відхилень напруги у вузлах, залежність втрат потужності в ЕМ від потужностей у її вузлах можна вважати лінійною. Отже, для дослідження впливу ВДЕ на втрати потужності в розподільних мережах з прийнятною точністю можна використовувати метод накладання, тобто визначати втрати згідно з (1.7).

Розосередження генерування електроенергії в розподільних електричних мережах змінює перетоки потужності в них, що впливає на параметри режиму, зокрема на втрати електроенергії. Виділити втрати в мережах від ВДЕ з сумарних втрат можна, використавши коефіцієнти розподілу втрат у вітках. Останні показують, яку частку в сумарних втратах в  $i$ -й вітці складає протікання по ній потужності від кожного вузла, в тому числі і від ВДЕ.

Для підвищення ефективності використання різнотипних ВДЕ і забезпечення надійного електропостачання споживачів якісною електроенергією згідно з графіком навантаження необхідно створити систему керування ВДЕ з врахуванням їх розосередження в просторі і часі.

## **1.2 Характеристика відновлюваних джерел електроенергії, як об'єкта керування**

Модернізація сучасних систем електропостачання з розвитком відновлюваних джерел електроенергії і обмеженням централізованого електропостачання тісно пов'язана з *SMART Grid* технологіями [47–50]. Планований техніко-економічний ефект від впровадження ВДЕ може бути досягнутий шляхом узгодження в часі оптимізації процесів вироблення, транспортування і споживання електроенергії. Електричні мережі за рахунок локальних систем керування, самоналагодження та самодіагностування можуть здійснювати регулювання постачанням електроенергії в залежності від режиму її споживання, але за умови достатнього інформаційного забезпечення. За допомогою сучасних інформаційно-комунікаційних технологій «розумні» мережі забезпечать інформаційне сполучення централізованого електропостачання, а також споживачів електроенергії з ВДЕ (рис. 1.4).

Шановний читачу!

Умови придбання надрукованих примірників монографії наведені на сайті видавництва <http://publish.vntu.edu.ua/get/?isbn=978-966-641-577-9>

Уважаемый читатель!

Условия приобретения печатных экземпляров монографии приведены на сайте издательства <http://publish.vntu.edu.ua/get/?isbn=978-966-641-577-9>

Dear reader!

You may order this monograph at the Web page <http://publish.vntu.edu.ua/get/?isbn=978-966-641-577-9>

*Наукове видання*

**Лежнюк Петро Дем'янович,  
Ковальчук Олексій Афанасійович,  
Нікіторович Олександр Володимирович,  
Кулик Володимир Володимирович**

**ВІДНОВЛЮВАНІ ДЖЕРЕЛА ЕНЕРГІЇ  
В РОЗПОДІЛЬНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ**

Монографія

Редактор С. Могила

Оригінал-макет підготовлено В. Куликом

Підписано до друку 03.07.2014 р.

Формат 29,7×42¼. Папір офсетний.

Гарнітура Times New Roman.

Друк різнографічний. Ум. др. арк. 11,78

Наклад 300 (1-й запуск 1–75) прим. Зам № В2014-32

Вінницький національний технічний університет,

КІВЦ ВНТУ,

21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95,

ВНТУ, ГНК, к. 114.

Тел. (0432) 59-85-32.

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи

серія ДК № 3516 від 01.07.2009 р.

Віддруковано ФОП Барановська Т. П.

21021, м. Вінниця, вул. Порики, 7.

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи

серія ДК № 4377 від 31.07.2012 р.