

Міністерство освіти і науки України  
Вінницький національний технічний університет

**П. Д. Лежнюк, О. Є. Рубаненко, І. О. Гунько**

**ОПТИМІЗАЦІЯ РЕЖИМІВ  
ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ З ВІДНОВЛЮВАНИМИ  
ДЖЕРЕЛАМИ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ**

**Монографія**

Вінниця  
ВНТУ  
2017

УДК 621.316.1  
Л49

Рекомендовано до видання Вченою радою Вінницького національного технічного університету Міністерства освіти і науки України (протокол № 3 від 26 жовтня 2017 р.)

Рецензенти:

**М. С. Сегеда**, доктор технічних наук, професор

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

**В. А. Матвійчук**, доктор технічних наук, професор

**Лежнюк, П. Д.**

Л49 Оптимізація режимів електричних мереж з відновлюваними джерелами електроенергії : монографія / П. Д. Лежнюк, О. Є. Рубаненко, І. О. Гунько – Вінниця : ВНТУ, 2017. – 164 с.

ISBN 978-966-641-717-9

В монографії розглянуто проблему оптимального інтегрування відновлюваних джерел енергії в розподільні електричні мережі. Проведено аналіз технічного стану обладнання, що експлуатується в розподільних електричних мережах. Розглянуто метод коригування потоків потужності в локальних електричних системах з різнотипними відновлюваними джерелами електроенергії шляхом оптимального керування потужністю генерування розосередженими джерелами енергії, на прикладі малих гідроелектростанцій, а в перспективі сонячних електростанцій, що дозволяє визначити умови для наближення поточкорозподілу в секціонованій електричній мережі до оптимального за втратами електроенергії в ній.

УДК 621.316.1

ISBN 978-966-641-717-9

© П. Лежнюк, О. Рубаненко, І. Гунько, 2017

## ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	5
ВСТУП .....	6
1.1 Сучасні локальні електричні системи як об'єкт керування .....	7
1.2 Характеристика джерел живлення в ЛЕС .....	14
1.3 Аналіз стану електрообладнання локальних електричних систем .....	24
1.3.1 Дослідження пошкоджуваності повітряних та кабельних ЛЕП в ЛЕС .....	26
1.3.2 Дослідження пошкоджуваності трансформаторних підстанцій та розподільних пунктів .....	31
1.3.3 Відмови в роботі електрообладнання ЛЕС, викликаних РДЕ .....	33
1.4 Дослідження методів оптимізації режимів локальних електричних систем .....	34
1.5 Впровадження сучасних Smart Grid в локальних електричних системах.....	44
РОЗДІЛ 2 МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ВПЛИВУ РІЗНОТИПНИХ РДЕ НА ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ, РЕЖИМИ ТА ВТРАТИ В РЕМ .....	47
2.1 Моделі розподільних електричних мереж з пошкодженням високовольтним обладнанням .....	47
2.2 Визначення місць секціонування в РЕМ з ВДЕ.....	58
2.2.1 Визначення місць секціонування в РЕМ з умов надійності.....	58
2.2.2 Визначення оптимальних за втратами електроенергії місць поточкорозподілу в РЕМ з ВДЕ.....	61
2.3 Визначення зон нечутливості відхилень оптимальних точок поточкорозподілу до потужності навантаження і генерування РДЕ .....	63
РОЗДІЛ 3 АЛГОРИТМИ ВИЗНАЧЕННЯ ВПЛИВУ РОЗПОДІЛЕНОГО ГЕНЕРУВАННЯ НА ФУНКЦІОНУВАННЯ ЛОКАЛЬНОЇ ЕЛЕКТРИЧНОЇ СИСТЕМИ І ФОРМУВАННЯ УМОВ ОПТИМАЛЬНОСТІ ЇЇ РЕЖИМІВ.....	68
3.1 Оптимізація схеми РЕМ з РДЕ з урахуванням зміни місця секціонування .....	68

3.1.1 Секціонування РЕМ з РДЕ з урахуванням вимог надійності.....	68
3.1.2 Визначення місця секціонування РЕМ за мінімальними втратами і в залежності від генерування РДЕ.....	77
3.2 Алгоритм визначення потужності ГЕС в задачі коригування потоків потужності в РЕМ у відповідності до оптимальної точки потокорозподілу .....	81
3.3 Алгоритм визначення зони нечутливості втрат потужності до генерування РДЕ в ЛЕС.....	84
3.4 Визначення зони нечутливості АСК при заданому допустимому відхиленні втрат потужності від оптимального значення .....	92
3.4.1 Визначення допустимого відхилення втрат потужності і допусків генерування РДЕ з врахуванням похибок вихідних даних і точності апроксимації залежностей.....	96
<b>РОЗДІЛ 4 ОПТИМАЛЬНЕ КЕРУВАННЯ РЕЖИМАМИ РОЗПОДІЛЬНОЇ ЕЛЕКТРИЧНОЇ МЕРЕЖІ З ВДЕ.....</b>	
4.1 Розрахунок впливу потужності РДЕ на точку потокорозподілу і на втрати потужності в РЕМ.....	98
4.2 Ефект від встановлення реклоузера в точці потокорозподілу РЕМ.....	104
4.3 Моделювання режимів роботи РЕМ в <i>PS CAD</i> .....	106
4.4 Програмне забезпечення для визначення раціонального місця секціонування електричної мережі з РДЕ.....	112
4.5 Структурна схема автоматизованої системи керування потужністю генерування ГЕС .....	120
<b>ВИСНОВКИ.....</b>	123
<b>СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....</b>	125
Додаток А PQ ТА U/F КОНТРОЛЕРИ.....	136
Додаток Б ВИЗНАЧЕННЯ КОНТУРНИХ СТРУМІВ.....	139
Додаток В РОЗРАХУНОК ВТРАТ АКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ В МАТНСАД .....	142
Додаток Г КОД ПРОГРАМИ «СЕКЦІОНУВАННЯ РОЗПОДІЛЬНИХ МЕРЕЖ З ВДЕ» .....	148

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

АСДК	– автоматизована система диспетчерського керування
ВДЕ	– відновлювані джерела енергії
ГЕС	– гідравлічна електростанція
ЕЕС	– електроенергетична система
ЕМ	– електрична мережа
ЕПК	– енергопостачальна компанія
ЕРС	– електрорушійна сила
КАСМ	– комутаційний апарат секціонування мереж
КЛ	– кабельна лінія
ЛЕП	– лінія електропередачі
ЛЕС	– локальна електрична система
ОПН	– обмежувач перенапруг
РДЕ	– розосереджені джерела енергії
РЕМ	– розподільна електрична мережа
САК	– система автоматизованого керування
СЕС	– сонячна електрична станція (прямого перетворення енергії)
СТ	– силовий трансформатор
ТН	– трансформатор напруги

## ВСТУП

Розподільні електричні мережі функціонально були призначені для транспортування і розподілення електроенергії, виробленої централізовано на великих електростанціях. З розбудовою в них нетрадиційних і відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) вони набувають рис локальної електроенергетичної системи (ЛЕС). В зв'язку з цим виникають нові задачі: узгодження графіків навантаження споживачів і генерування ВДЕ з врахуванням їх нестабільності, оптимальне керування потоками потужності з метою зменшення втрат електроенергії і покращення її якості, забезпечення балансової надійності електроенергії в ЛЕС, що формується централізованим і місцевим генеруванням, тощо.

Особливістю розподіленого генерування є те, що воно складається з відносно невеликих за потужністю електричних станцій, розосереджених по всій електроенергетичній системі (ЕЕС), але сконцентрованих в більшості в розподільних електричних мережах (РЕМ). В основному, це електростанції, які використовують відновлювані джерела електричної енергії. Це сонячні (СЕС), вітрові (ВЕС) електростанції та малі гідроелектростанції, генерування яких є нестабільним, оскільки залежить від природних умов. Вони постачають електроенергію найближчим споживачам, а в разі надлишків енергії можуть її передавати в мережі централізованого електропостачання. Отже, розподільні мережі енергопостачальних компаній мають забезпечувати перетікання електроенергії від розподільних підстанцій до споживачів, а також від розосереджених в них джерел електроенергії (РДЕ) через підстанції до ЕЕС.

Серед багатьох інших, до таких задач відноситься узгодження місць оптимального секціонування РЕМ, що експлуатуються як радіальні. Введення в них електростанцій, які використовують ВДЕ, переводить частину ліній електропередачі в режим роботи з двостороннім живленням.

Це змінює потік розподіл в мережі, що може спричинити збільшення втрат електроенергії в ній, якщо не оптимізувати місця під'єднання РДЕ та їх потужність. Для зменшення втрат електроенергії під час її транспортування також необхідно коригувати потоки потужності, що відповідають місцям секціонування РЕМ, які раніше були вибрані тільки з умов забезпечення нормативів по надійності електропостачання. Тому оптимізація потоків потужності в ЛЕС з ВДЕ є актуальним завданням, покликаним забезпечити зменшення втрат електроенергії в електричних мережах, підтримувати баланс надійності і покращити якість електропостачання.

# РОЗДІЛ 1

## АНАЛІЗ МЕТОДІВ ТА ЗАСОБІВ ОПТИМАЛЬНОГО КЕРУВАННЯ РЕЖИМАМИ ЛОКАЛЬНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ СИСТЕМ З РОЗОСЕРЕДЖЕНИМИ ДЖЕРЕЛАМИ ЕНЕРГІЇ

### 1.1 Сучасні локальні електричні системи як об'єкт керування

Сучасні локальні електричні системи (ЛЕС) України є складовою частиною розподільних електричних мереж (РЕМ) енергопостачальних компаній (ЕПК) [1, 2, 3, 4]. ЛЕС є розподільною електричною мережею або її частиною, в якій в якості джерел енергії використовуються джерела розосередженого генерування, що використовують нетрадиційні та відновлювальні джерела енергії. В даний час існує багато проектів ЛЕС по всьому світі, таких як, наприклад, ЛЕС Кіфнос в Греції, ЛЕС Айти, Кіятанго і Хачінохе ЛЕС в Японії [5] і т. п.

Ознакою ЛЕС є підключення до РЕМ розосереджених джерел електроенергії. Стрімке зростання тарифів на електричну енергію спонукає не лише представників середнього та малого бізнесу, а і населення України використовувати сонячні теплові колектори, фотоелектричні модулі, сонячні електричні станції, сонячні теплові електричні станції, малі, міні та мікро гідроелектростанції (ГЕС), когенераційні установки, вітрові електричні станції і т. п. [6]. Використання власних відновлювальних джерел енергії споживачами зменшує споживання вартісної електроенергії від центрів живлення.

З часом надлишок електроенергії такі споживачі мають змогу віддавати в РЕМ енергопостачальних компаній (ЕПК), перетворюючи їх в активні елементи ЛЕС. Існуючі в наш час тарифи на генеровану такими активними споживачами (АС) електроенергію, а також заходи з пільгового кредитування заохочують споживачів впроваджувати в себе ВДЕ [7]. Так, наприклад, для приватних домогосподарств, які виробляють електричну енергію з допомогою сонячних панелей, змонтованих на дахах та (або) фасадах приватних домогосподарств, потужності яких не перевищують 30 кВт та які введені в експлуатацію з 1 січня по 31 грудня 2016 року, встановлений «зелений» тариф на електричну енергію становить 534,43 коп/кВт·год. Як свідчать дослідження Державного агентства з енергоефективності та енергозбере-

ження України термін окупності, наприклад, СЕС потужністю 30 кВт за умови власного споживання 4000 кВт·год/рік становить близько 7 років [8].

Водночас впровадження ВДЕ представниками різних форм власності покликано розвантажити РЕМ, підвищити їх ефективність, наприклад, наближуючи ВДЕ до споживачів та зменшуючи за рахунок цього втрати електричної енергії на транспортування. Підвищується надійність та покращується якість електропостачання, що підвищує соціальні стандарти населення, яке мешкає в районі ЛЕС.

Розвиток ЛЕС та РДЕ також має і значний науково-соціальний ефект, що, наприклад, полягає у використанні сучасних нанотехнологій у сонячних панелях СЕС та у накопичувачах енергії, використання *SMART* вимірвальних, облікових та діагностичних систем, *SMART* систем релейного захисту та автоматики. Останнє створює умови для: гнучкого регулювання рівнів вузлових напруг як показників якості електричної енергії; керування напрямками та значеннями струмів у лінійних і трансформаторних вітках схеми розподільних мереж та уникнення їх аварійних перевантажень; зменшення частки вартості традиційних видів палива у вартості електроенергії, відпущеної споживачам; зменшення впливу традиційних джерел електроенергії на екологію за рахунок зменшення їх генерування, зменшення вартості виробленої споживачами продукції за рахунок зменшення витрат на спожити від центру живлення електроенергію [9]. Також факторами, які сприяють розбудові ЛЕС та все ширшому впровадженню РДЕ, є їхня екологічна привабливість.

Однак, враховуючи залежність роботи ВДЕ від природних факторів, не завжди достатню для споживачів їх потужність, бажаним, а інколи і необхідним, залишається комбіноване використання традиційних джерел живлення та ВДЕ. Реалізація перерахованих переваг РДЕ значною мірою залежить від РЕМ. Основною системою напруг в ЛЕС є система 110/35/10/0,4 кВ з підсистемами напруг 110/10/0,38 кВ і 35/10/0,38 кВ. Ефективність роботи ЛЕС значною мірою залежить від надійної роботи її елементів: від схеми РЕМ, від можливості резервування, від місць встановлення та оптимального використання комутаційних апаратів (секційних роз'єднувачів, вимикачів, реклоузерів), засобів автоматики, збору, фіксації та передачі інформації про пара-



метри режиму ЛЕС та місце пошкодження в ЛЕС. Основна вимога до схеми ЛЕС – забезпечення максимально можливого резервування при мінімальній загальній довжині ліній, при мінімальній кількості резервних зв'язків і обладнання.

У деяких ЕПК застосовують багатоступеневу систему трансформації 110/35/0,38 і 110/10/0,38 кВ. При такій трансформації на 30 % знижується потреба в трансформаторній потужності, значно скорочуються втрати енергії і поліпшується якість напруги у споживачів. Подальше скорочення кількості трансформації пов'язується з переведенням мереж 35, 10 і 6 кВ на напругу 20 кВ з одночасною реконструкцією мережі 0,38 кВ шляхом впровадження розукрупнених підстанцій 20/0,38 кВ.

Відомо [10], що більше половини загальних витрат на електропостачання споживачів ЛЕС становлять витрати на будівництво та експлуатацію розподільних ліній електропередач 6–10 і 0,4 кВ. Тому з економічних міркувань ці лінії часто споруджують повітряними, у яких 70–80 % вартості становить вартість будівельної частини. Ефективними шляхами зниження витрат на електропостачання є скорочення протяжності розподільних ліній, удосконалення методів механічного розрахунку проводів і опор, застосування нових провідникових і будматеріалів. Скорочення протяжності РЕМ ЛЕС зумовило формування їх як радіальних мереж.

Одним з ефективних способів підвищення надійності роботи радіальних ліній 6–10 кВ ЛЕС є автоматичне резервування та секціонування [11]. Резервування в РЕМ може здійснюватись шляхом використання резервних джерел живлення (в ЛЕС – це РДЕ), кільцевих схем (в ЛЕС не використовуються) та резервних ЛЕП [12]. Секціонування ЛЕС полягає в поділі лінії на ділянки за допомогою комутаційних апаратів, які працюють автоматично. Пункти секціонування встановлюються як на магістралі (послідовне секціонування), так і на початку відгалужень (паралельне секціонування). Ефект від автоматичного секціонування отримується за рахунок того, що при короткому замиканні (КЗ) за пунктом секціонування зберігається живлення решти споживачів, приєднаних до цього пункту.

До радіальних, взаємно-резервованих ліній 10 кВ ЛЕС приєднують опорні трансформаторні підстанції 10/0,4 кВ (ОТП). ОТП являють собою ТП 10/0,4 кВ з розвиненим розподільним пристроєм 10 кВ, до

якого приєднуються радіальні лінії 10 кВ. Розподільні пункти (РП) призначені для автоматичного секціонування і резервування ЛЕП, розміщення автоматики і телемеханіки. Лінійні роз'єднувачі 10 кВ встановлюються на магістралі повітряної лінії 10 кВ (ПЛ 10 кВ) для обмеження довжини ділянки лінії ЛЕС, включаючи відгалуження до 3,5 км; на відгалуженні від ПЛ 10 кВ, при його довжині понад 2,5 км.

Приклад фрагменту схеми ОТП ЛЕС представлено на рис. 1.1. У вузлах мережі 10 кВ споруджено розподільні пункти. Трансформаторні підстанції 10/0,4 кВ можуть отримувати живлення від шин 10 кВ ОТП.

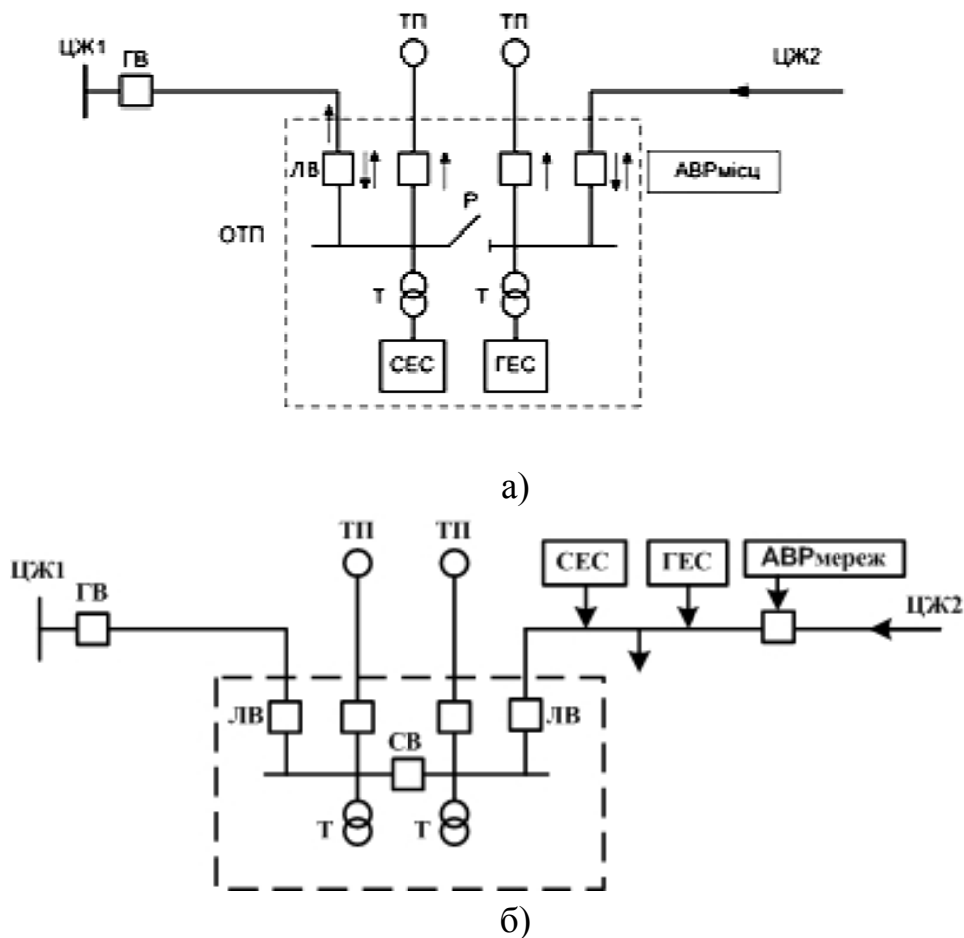


Рисунок 1.1 – Схеми опорних трансформаторних підстанцій ЛЕС:  
а) – схема з місцевим АВР; б) – схема з мережевим АВР

На рис. 1.1 використано такі позначення: ЦЖ – центр живлення; ГВ, СВ, ЛВ – головний, секційний та лінійний вимикачі; Р – роз'єднувач; Т – трансформатор 10/0,38 кВ; АВР<sub>місц</sub> – місцевий при-

стрій введення резерву;  $ABP_{\text{мереж}}$  – мережевий пристрій введення резерву.

З метою зменшення наслідків масових відмов в ЛЕС, викликаних несприятливими природними умовами (ожеледдю, вітровими навантаженнями, підвищеною грозовою активністю і т. п.), електропостачання споживачів ЛЕС резервується автономними джерелами резервного електроживлення, наприклад, малими, міні- або мікро-ГЕС.

Великі відповідальні споживачі (тваринницькі комплекси, птахофабрики і т. п.) з навантаженням 1 МВт і вище, як правило, отримують живлення від своєї підстанції 110 (35)/10 кВ, наприклад, ТОВ «Вінницька птахофабрика» Вінницької області (найбільша птахофабрика у Європі).

Більшу частину споживачів ЛЕС України становлять споживачі, розташовані в сільській місцевості. Основними виробничими споживачами ЛЕС в сільській місцевості є тваринницькі ферми і комплекси, птахофабрики, зерноочисні пункти, льоно- і сіносушарки, млини, гаражі, котельні, підприємства з обслуговування сільського господарства та переробки сільськогосподарської продукції.

Велике значення має електроенергія в тваринництві, тваринницьких і птахівничих комплексах з виробництва молока, яловичини, свинини, м'яса птиці на промисловій основі. За рівнями електроспоживання та складності електрообладнання такі споживачі відповідають промисловим підприємствам. Наприклад, річне електроспоживання комплексу по відгодівлі великої рогатої худоби становить 6 млн кВт·год/рік, а птахофабрики – 3 млн кВт·год/рік. Адже не секрет, що на сьогоднішній день приріст сільськогосподарської продукції на 1 % тягне за собою збільшення витрат енергоресурсів на 2–3 % [13]. Перерви в електропостачанні призводять до порушення технологічних процесів доїння та годування, що призводить до втрат продукції. Так, під час переходу на ручне доїння знижуються надії молока, зменшується його жирність.

На даний момент обладнання та стан експлуатації електричних мереж в цілому дозволяють працювати з нормованими показниками з якості електроенергії та з надійності електропостачання, навіть з урахуванням того, що обладнання мереж постійно старішає. Проте розподільні мережі 6–10 кВ практично не витримують суттєвих стихій-

них лих. Стихійні явища (сильні вітри, шквали, підвищена грозова активність) призводять до масових аварій. У таких випадках відключають на тривалий час велику кількість споживачів незалежно від наявності мережевого резерву.

Відсутність мережевого резервування значної кількості сільськогосподарських електроприймачів (ЕП) компенсувалася в період планової економіки наявністю резервних джерел стаціонарних і пересувних вартісних та енерговитратних дизельних електроагрегатів, які були в наявності у сільськогосподарських споживачів. В наш час необхідним заходом із забезпечення ефективного функціонування агропромислового комплексу України, поряд з іншими заходами, є все ширше впровадження РДЕ, використання ВДЕ та оптимізація режимів ЛЕС.

Ознакою ЛЕС великих та середніх міст є використання кабельних ліній, де основними за надійністю електропостачання є споживачі I-ї і II-ї категорій. Ситуація ускладнюється збільшенням частки споживачів I-ї категорії в містах з багатоповерховими будівлями (наприклад, ліфтові установки), а також зі зміною вимог нормативних документів. Так, Правила пожежної безпеки відносять системи пожежної сигналізації, димовидалення та насоси пожежного водопостачання в низці випадків до електроприймачів I-ї категорії.

Пошкодження кабельної лінії (КЛ) та її ремонт може спричинити відключення електроприймачів III-ї категорії, а для електроприймачів I-ї та II-ї категорій буде порушена нормальна схема електропостачання – втрачено одне з двох незалежних джерел живлення. При відключенні другого джерела живлення з будь-якої причини (зношування обладнання, стихійне лихо або вплив сторонніх осіб) ці споживачі будуть знеструмлені, що матиме негативні наслідки. Отже, потрібно забезпечувати резервування кожного елемента мережі. Однак завдання побудови схем резервного електропостачання ускладнюється в умовах експлуатації кабельних електричних мереж 6–10 кВ в середніх і великих містах. Керовані РДЕ в таких мережах та ситуаціях в будь-який час (а умовно-керовані РДЕ під час їх роботи) можуть бути використані як резервні джерела живлення, що дозволить підвищити надійність РЕМ.

У більшості країн світу РДЕ, які використовують ВДЕ, розповсюджені в комунальній сфері та у побутовому секторі. Як приклад варто згадати офшорні вітрові електростанції (ВЕС), фотоелектричні панелі,

змонтовані на дахах та фасадах будинків, квартир і громадських будівель і т. п. Прикладом такого застосування СЕС є голландське містечко *Nieuwland*, що поблизу міста *Amersfoort*, в якому експлуатуються сонячні панелі площею 12000 м<sup>2</sup>, розташовані на понад 500 будинках (рис. 1.2).

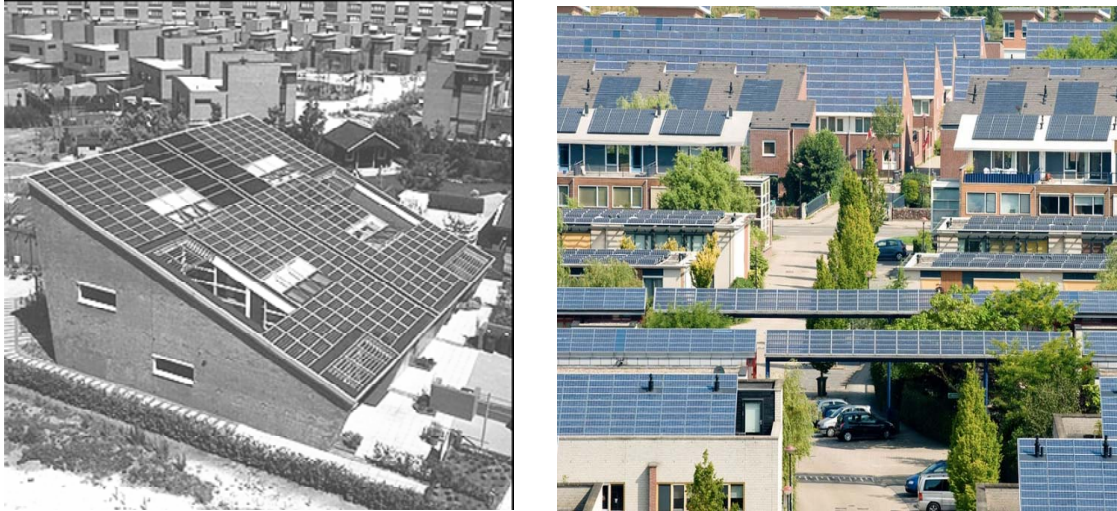


Рисунок 1.2 – Дахова данська СЕС у передмісті *Nieuwlanda* біля міста *Amersfoort*

Однак, збільшення кількості РДЕ (СЕС, мікротурбін ГЕС та ВЕС) в ЛЕС на одній ЛЕП призводить до погіршення показників якості електричної енергії. Наприклад, до понаднормованого зростання або зменшення напруги у вузлах ЛЕС або до обмеження генерованої РДЕ потужності, наприклад у сонячні дні. Така проблема особливо актуальна для ЛЕС класу напруги 0,4 кВ, однак вона має місце і на 6–10 кВ. Це, в свою чергу, викликає необхідність частого регулювання напруги, наприклад, за допомогою пристроїв РПН (ПБЗ), що спричиняє швидке спрацьовування ресурсу цих пристроїв та витрат на їх обстеження, ремонт або заміну. Також погіршення показників якості електричної енергії призведе до пошкодження розрядників та обмежувачів перенапруг, вимірювальних трансформаторів напруги, кабельних муфт, ламп освітлення, пристроїв релейного захисту та автоматики і т. п. Велика кількість інверторів СЕС, приєднаних до одного фідера, під час неузгодженого між ними їх увімкнення в мережу призводить до мережових резонансів, тривалих гармонійних спотворень напруг та струмів [14, 15]. Відомі випадки взаємовпливу інверторів різних влас-

ників СЕС під час їх послідовного увімкнення з малим інтервалом, особливо за умов використання контролерів, керованих високовольтною мережею [16].

Також недоліком ЛЕС є нестабільність роботи та погіршення ефекту керування режимом ЛЕС при суттєвих порушеннях в роботі електроенергетичної системи (ЕЕС) [17].

Отже, в наш час необхідним заходом з забезпечення ефективного функціонування систем електропостачання підприємств різних галузей промисловості, агропромислового комплексу України, муніципального господарства, поряд з іншими заходами, є все ширше впровадження РДЕ та оптимізація ЛЕС (схем, режимів, обладнання, експлуатації і т. п.).

## 1.2 Характеристика джерел живлення в ЛЕС

Важливою складовою частиною ЛЕС, яка відрізняє їх від РЕМ, є наявність РДЕ, які в більшості випадків є ВДЕ. Все частіше в одній ЛЕС одночасно використовуються різнотипні РДЕ [17], які поділяються на керовані та умовно-керовані [4]. Останні, маючи дешеві відновлювальні, але не стабільні джерела енергії (вітер, воду, сонце), потребують взаємного узгодженого, оптимального їх застосування з метою отримання максимального загальносистемного ефекту [18]. Він складається, наприклад, з підвищення надійності електропостачання в ЛЕС [19], зменшення числового значення *SAIDI*, зменшення частки покупної електричної енергії у вартості продукції споживачів ЛЕС, підвищення ефективності роботи ЕПК за рахунок зменшення втрат електричної потужності і т. п.

Так, на кінець 2013 року [20] (а у 2014 році – в [21], у 2015 році – в [22]), частка відновлювальної енергетики у світовому енергобалансі становила майже 22,1 %, (як показано на рис. 1.3а). З кожним роком вона зростає, що пов'язано зі стрімким зростанням цін на викопне паливо. Також з кожним роком зростає і потужність фотоелектричних систем у світі, яка на кінець 2013 року становила 139 ГВт [23] (рис. 1.3б).

В розвинутих країнах світу, таких як Нідерланди, Японія, Данія, Німеччина та інші, створюються навіть цілі міста, що використовують сонячні панелі на дахах будинків [16].

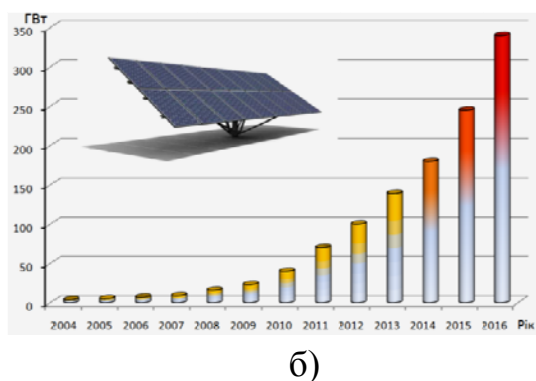
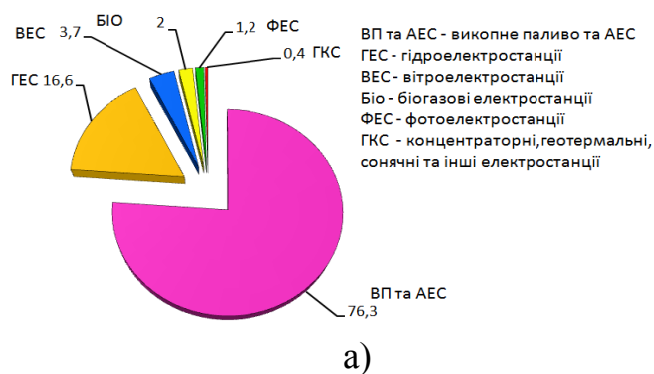


Рисунок 1.3 – Розвиток відновлювальної енергетики в світі:  
 а) частка відновлювальної енергетики в світовому енергобалансі;  
 б) встановлена потужність фотоелектричних систем в світі  
 (2004–2012 дані [20], 2014–2015 – [23], 2016 – апроксимовані)

Частка відновлювальної енергетики у встановленій потужності електроенергетики України поки що незначна, однак з кожним роком зростає (рис. 1.4).

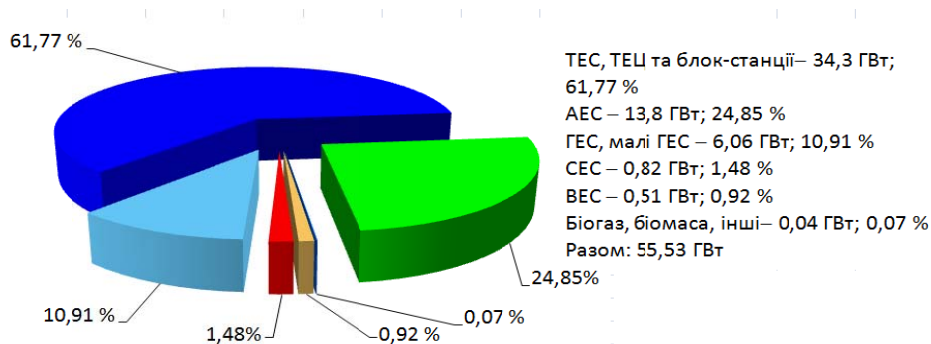


Рисунок 1.4 – Діаграма встановленої потужності електроенергетики України у 2015 році [22]

Різними відновлюваними джерелами енергії України у 2015 році вироблено близько 1,75 млрд кВт-год електроенергії або 1 % від загального виробництва електроенергії в Україні. Для порівняння частка

відновлювальної енергетики в загальному енергобалансі України в 2011 році становила лише 0,17 % [21]. Станом на 1 січня 2015 року в Україні встановлена потужність об'єктів відновлюваної енергетики, яким встановлено «зелений» тариф, становила 1462,2 МВт, з яких у 2014 році було введено 280,6 МВт.

Станом на 1 липня 2016 р. загальні потужності відновлюваних джерел енергії в Україні, враховуючи об'єкти сонячної і вітрової енергетики, малої гідроенергетики та електростанцій на біомасі (біогазі) склали 1028 МВт. Зокрема, загальна потужність українських сонячних електростанцій становили 453 МВт, вітропарків – 426 МВт, електростанцій на біомасі – 31 МВт, малих ГЕС – 118 МВт (рис. 1.5). Головний внесок у розвиток галузі в 2016 р. зробили компанії сонячної енергетики, які побудували за зазначений період 12 нових електростанцій загальною потужністю 37 МВт. Найбільші в 2016 році потужності сонячних електростанцій – 22,2 МВт – побудовано в Херсонській, Хмельницькій і Вінницькій областях компанією «Подільський Енергоконсалтинг».



а)



б)



в)

Рисунок 1.5 – Розосереджені джерела енергії в Ямпільських РЕМ:  
а), б) – Слобода-Бушанська мала ГЕС; в) – Слобода-Бушанська СЕС



В сегментах вітрової енергетики та малої гідроенергетики нові об'єкти протягом першого півріччя 2016 р. не будувались.

За даними звіту *SEF 2016 KYIV*, в цілому до кінця 2016 р. українські та зарубіжні девелопери планували побудувати в Україні 34 нових сонячних електростанції загальною потужністю понад 120 МВт [22]. Зокрема, у 2-й, половині 2016 р. компанія «Подільський Енергоконсалтинг» планувала побудувати у Вінницькій області кілька нових об'єктів загальною потужністю 34 МВт. Компанія «Парадигма Інвест Групп» планує завершити в поточному році будівництво станції потужністю 18,3 МВт у Івано-Франківській області. В цій же області компанія «Солар-Стальконструкція» закінчує будівництво нового об'єкта потужністю 4,1 МВт. У Дніпропетровській області компанія «Українські Системи Солар» планує ввести в експлуатацію унікальний об'єкт – першу українську станцію на трекерах (система слідування за Сонцем) мегаватного класу (потужність – 1,7 МВт).

Також 11 інвестиційних проектів знаходиться на етапі розгляду зарубіжними інвесторами в сегментах біомаси та вітроенергетики. Зокрема, про свій інтерес до ринку біомаси заявили девелопери з Китаю та Південної Кореї. У сегменті теплогенерації на основі біомаси загальні потужності котельних становлять в Україні понад 240 МВт (без врахування побутових котлів).

За результатами проведених досліджень вітчизняних та іноземних літературних джерел РДЕ класифікуються таким чином:

- за первинними джерелами енергії: на РДЕ, що споживають викопні не відновлювані види палива (дизельні електричні станції – ДЕС, теплоелектроцентралі – ТЕЦ, когенераційні установки, твердопаливні установки) та на РДЕ, що споживають відновлювані види енергії (СЕС, ГЕС, ВЕС);

- за реалізацією виробленої електричної енергії: лише для власних потреб, лише для направлення електроенергії в мережі централізованого електропостачання, для власних потреб та з можливістю направлення надлишків енергії в мережі централізованого електропостачання, для резервування джерел централізованого живлення;

- за генерованою потужністю: на малі, міні та мікро;

- за рівнем автоматизації: обладнані сучасними *SMART* пристроями (технологічної, електричної режимної й протиаварійної автоматики та релейного захисту, вимірювальними системами та пристроями об-

ліку електроенергії, пристроями накопичення, зберігання та передавання даних і т. п.).

- за виконанням: електромашинні та напівпровідникові;
- за терміном експлуатації: до трьох років (нові), від трьох до 20 років (найбільш надійні в межах паспортного ресурсу), від 20 до 25 років (застарілі, менш надійні в межах паспортного ресурсу), понад 25 років (старі, з відсутнім паспортним ресурсом);
- за наявністю резервних ЛЕП в місці приєднання до РЕМ ЕПК: є резервні ЛЕП, немає резервних ЛЕП.

Останнім часом ЛЕС виконується з метою зменшення залежності від систем централізованого електропостачання як система гібридного покоління, яка складається з генераторів на дизельному пальному, вітрогенераторів, СЕС, ГЕС, паливних елементів електролізерів і т. п. [5].

Для більш ефективного застосування різнотипних РДЕ в ЛЕС використовуються різні сучасні системи автоматичного керування (САК) увімкненням, вимкненням та потужністю РДЕ [24]. Це дає можливість підтримувати технічно та економічно доцільні рівні напруг в ЛЕС, наприклад зменшити коливання напруг та потужностей під час перехідних процесів, викликаних аваріями, перемиканнями і т. п.; відключеннями генераторів та ЛЕП в ЕЕС. Ознакою сучасних РДЕ є застосування мікропроцесорних, напівпровідникових перетворювачів електроенергії, сучасних пристроїв технологічної та електричної автоматики, яка реалізовує, залежно від задач, різні закони керування. Як приклад розглянемо автоматику керування інверторами СЕС та схемні рішення деяких з них.

Технологічна схема СЕС показана на рис. 1.6 [25]. Основними елементами СЕС є сонячні панелі, інвертор, збірна трансформаторна підстанція та розподільний пункт. Важливим пристроєм СЕС є інвертор, основне призначення якого – перетворення постійної напруги на змінну трифазну напругу, відслідковування точки максимального генерування (*maximum power tracking point – MPPT*), автоматичної синхронізації напруги інвертора з напругою мережі (*phase-locked loop-PLL*) та інші.

В інверторах СЕС реалізуються різні закони керування, серед яких такі як пропорційно-інтегральний (*PI*), пропорційно-резонансний (*PR*) та прогнозуючий (*DB*) закони (рис. 1.7) [26]. Кожен з законів керування, реалізованих в інверторах СЕС, має свої переваги та недоліки. В нашій роботі розглядаються можливості використання СЕС для

генерування за заданими графіками з метою коригування потоків потужності в ЛЕС для зменшення в ній втрат електроенергії. Тому доцільно розглянути, наскільки інвертори з перерахованими законами керування відповідають цій меті.



Рисунок 1.6 – Технологічна схема СЕС



Рисунок 1.7 – Класифікація законів керування інверторами СЕС

Відомо, що якість електричної енергії в ЛЕС залежить від параметрів, стану, режиму РДЕ і СЕС як одного з видів РДЕ. Водночас на показники якості електричної енергії значний вплив мають інвертори цих станцій і контролери. В експлуатації знаходяться СЕС багатьох виробників, у яких реалізують різні закони керування їх інверторами.

Розглянемо особливості пропорційно-інтегрального контролера інверторів СЕС. Відомо, що в пропорційно-інтегральному (*PI*) контролері інверторів СЕС зазвичай реалізується перетворення напруг і струмів з *abc* системи координат в *dq* систему координат [26]. Переда-

тна функція системи керування інвертором, яка працює за *PI* законом керування, визначається за виразом:

$$G_{PI}(s) = K_p + \frac{K_i}{s}, \quad (1.1)$$

де  $K_p$ ,  $K_i$  – пропорційний та інтегральний коефіцієнти підсилення контролера;  $s$  – оператор Лапласа.

Структурна схема керування інвертором СЕС з *PI* контролером показана на рис. 1.8.

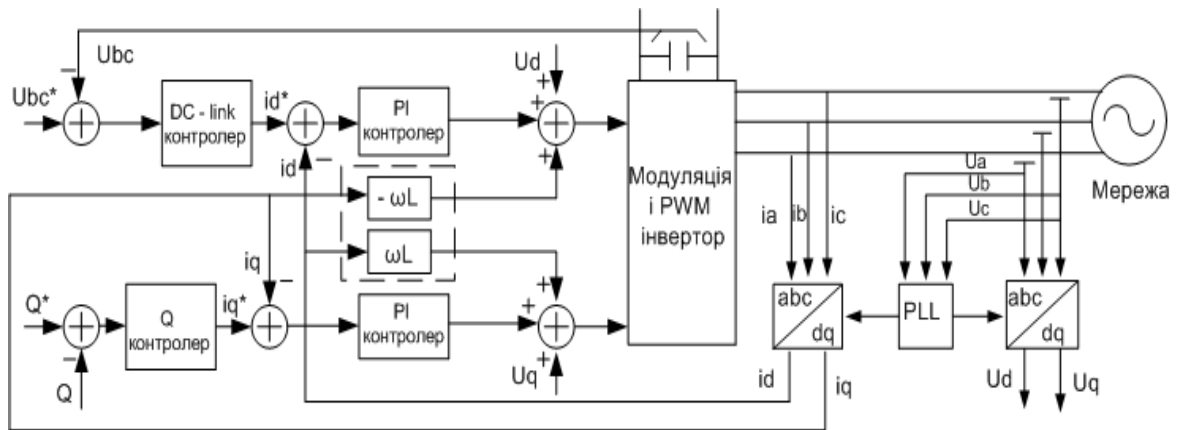


Рисунок 1.8 – Структурна схема модуля керування інвертором СЕС з використанням *PI* контролера [26]

З метою покращення характеристик СЕС програмне забезпечення контролера, який керує інвертором СЕС, вдосконалюється. Так, зокрема, передатна функція в *abc* координатах системи керування інвертором СЕС, в якій застосовується *PI* закон керування, знаходиться за виразом:

$$G^{(abc)}_{PI}(s) = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} K_p + \frac{K_i s}{s^2 + \omega_0^2} & -\frac{K_p}{2} - \frac{K_i s + \sqrt{3} K_i \omega_0}{2(s^2 + \omega_0^2)} & -\frac{K_p}{2} - \frac{K_i s - \sqrt{3} K_i \omega_0}{2(s^2 + \omega_0^2)} \\ \frac{K_p}{2} - \frac{K_i s - \sqrt{3} K_i \omega_0}{2(s^2 + \omega_0^2)} & K_p + \frac{K_i s}{s^2 + \omega_0^2} & -\frac{K_p}{2} - \frac{K_i s + \sqrt{3} K_i \omega_0}{2(s^2 + \omega_0^2)} \\ -\frac{K_p}{2} - \frac{K_i s + \sqrt{3} K_i \omega_0}{2(s^2 + \omega_0^2)} & -\frac{K_p}{2} - \frac{K_i s - \sqrt{3} K_i \omega_0}{2(s^2 + \omega_0^2)} & K_p + \frac{K_i s}{s^2 + \omega_0^2} \end{bmatrix}, \quad (1.2)$$

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Кириленко О. В. Технічні особливості функціонування енергосистем при інтеграції джерел розподіленої генерації / О. В. Кириленко, І. В. Трач // Праці Інституту електродинаміки Національної академії наук України. – 2009. – Вип. 24. – С. 3–7.
2. Інтеграція поновлюваних джерел енергії в розподільні електричні мережі сільських регіонів / Ю. І. Тугай, В. В. Козирський, О. В. Гай, В. М. Бодунов // Технічна електродинаміка. – 2011. – № 5. – С. 63–67.
3. Кудря С. О. Нетрадиційні та відновлювані джерела енергії / С. О. Кудря. – К. : НТУУ «КПІ», 2012. – 492 с.
4. 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.
5. Ngamroo I. Robust coordinated control of electrolyzer and PSS for stabilization of microgrid based on PID-based mixed  $H_2/H_\infty$  control / I. Ngamroo // Renewable Energy. – 2012. – № 45. – С. 16–23.
6. Про встановлення «зелених» тарифів на електричну енергію для суб'єктів господарювання та надбавки до «зелених» тарифів за дотримання рівня використання обладнання українського виробництва: постанова НКРЕКП від 30.06.2016 №1187. [Електронний ресурс] – Офіційний вісник України – Київ : Парлам. вид-во, 2016 – № 62. – 2127 с. – Режим доступу: <http://www.nerc.gov.ua/web/printable.php>.
7. Про встановлення «зелених» тарифів на електричну енергію для приватних домогосподарств : постанова НКРЕКП від 30.06.2016 №1188. [Електронний ресурс] // Офіційний вісник України. – К. : Парлам. вид-во, 2016. – № 62. – 2127 с. – Режим доступу: <http://www.nerc.gov.ua>.
8. Державне агентство з енергоефективності та енергозбереження України: Типова фінансова модель СЕС приватного домогосподарства [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://ee.gov.ua/uk/newsletter/subscriptions>.
9. Dall'Anese E. Distributed optimal power flow smart microgrids / E. Dall'Anese, H. Zhu, G. Giannakis // IEEE Transaction on power electronics. – 2013. – № 3. – Р. 1464–1475.

10. Школа для электрика: Технические решения по обеспечению уровней надёжности в сельских электрических сетях 10 и 0,4 кВ [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://electricalschool.info/main/electroshemy/254-tekhnicheskie-reshenijapo.html>.

11. Холмский В. Г. Расчет и оптимизация режимов электрических сетей (специальные вопросы) : учебное пособие для вузов / В. Г. Холмский. – М. : Высшая Школа, 1975. – 280 с.

12. Лежнюк П. Д. Оптимізація функціонування розосереджених джерел енергії в локальних електричних системах / П. Д. Лежнюк, О. Є. Рубаненко, Ю. В. Малогулко // Вісник національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – 2014. – № 60. – С. 68–77.

13. Гулидов С. С. Технично-економический анализ надёжности электроснабжения сельскохозяйственных потребителей / С. С. Гулидов // Вестник Орел ГАУ «Научное обеспечение развития агротехники и энергосбережения». – 2012. – № 1 (34). – С. 144–146.

14. Денисюк С. П. Особенности анализа влияния помех от различных типов источников распределенной генерации на процессы в нагрузках / С. П. Денисюк, Д. Г. Деревянко, К. Ю. Щербань // Журнал инженерных наук. – 2014. – № 2. – С. 1–7.

15. Пат. №76464 Україна, МПК H02J23/00. Спосіб оптимального керування режимами роботи електроенергетичної системи / П. Д. Лежнюк., В. О. Лесько, О. О. Рубаненко, І. О. Рубаненко ; заявник та патентовласник Вінницький національний технічний університет. – № 2012 058664 ; заявл. 14.05.2012 ; опубл. 10.01.2013, Бюл. № 1.

16. Рубаненко О.Є. Вплив відновлювальних джерел енергії на технічний стан обладнання розподільних мереж / О. Є. Рубаненко, І. О. Гунько, А. В. Коваль // Екологічна безпека та відновлювальні джерела енергії : збірник доповідей Міжнародної науково-технічної конференції 24–25 травня 2017 року. – Вінниця : ВНТУ, 2017. – С. 82–93.

17. Tran, K. Effects of dispersed generation (DG) on distribution systems / K. Tran, M. Vaziri // Proc. of IEEE Power Engineering Society General Meeting. – 2005. – № 3. – P. 2173–2178.

18. Лежнюк П. Д. Вплив розосереджених джерел енергії на оптимальний поточкорозподіл в електричних мережах / П. Д. Лежнюк, І. О. Гунько // Вісник національного технічного університету «Харків-

ський політехнічний інститут». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – 2016. – № 18 (1190). – С. 86–91.

19. Петров П. В. Автоматизация секционирования распределительной сети в условиях стимулирующего регулирования / П. В. Петров // Электрические сети и системы. – 2015. – № 6 . – С. 6–7.

20. Power sector. Global status report [Електронний ресурс] // Renewables. Steering committee . – Ren. 21. – 2014. – С. 25–27. – Режим доступу: <http://www.ren21.net/Portals/0/documents/Resources>.

21. Відновлювана енергетика України стрімко зростає, але досі має мізерну частку [Електронний ресурс] / Зелена хвиля. – Режим доступу: <http://ecoclubua.com/2012/01/vidnovlyuvanaenerhetykaukrajiny2011>.

22. Асоціація «Інноваційний розвиток України» [Електронний ресурс] : 8-й міжнародний форум сталої енергетики в Україні SEF 2016 Kiev. – Електрон. текст. дан. – Режим доступу: <http://uaid.com.ua/initiative/8-j-mizhnarodnyj-forum-staloji-enerhetyky-v-ukrajini-sef-2016-kyiv>.

23. Power sector. Global status report [Електронний ресурс] // Renewables. Steering committee. – Ren. 21. – 2016. С. 21–23. – Режим доступу: [http://www.ren21.net/ds/2016/06/GSR\\_2016\\_KeyFindings1.pdf](http://www.ren21.net/ds/2016/06/GSR_2016_KeyFindings1.pdf).

24. Автоматизація роботи розосереджених джерел електроенергії в локальній електричній системі на основі концепції SMART Grid / П. Д. Лежнюк, О. В. Нікіторович, О. А. Ковальчук, В. В. Кулик // Праці Інституту електродинаміки Національної академії наук України : збірник наукових праць. Спеціальний випуск. – 2013. – С. 136–143.

25. Будівництво промислових СЕС [Електронний ресурс]. Інжинірингова компанія. – Нові енергетичні технології. – Режим доступу: <http://iknet.com.ua/uk/presentation/full/ses>.

26. Evaluation of current controllers for distributed power generation system / A. Timbus, M. Lisser, R. Teodorescu, P. Rodriguez, F. Blaabjerg // IEEE Transactions on power electronics. – 2009. – № 3. – С. 654–664.

27. Рекомендации по организации учета и анализа отключений в воздушных электрических сетях напряжением 0,38–20 кВ. – М. : ОРГ-РЭС, 1994. – 20 с.

28. Миловидов С. С. Надежность городских кабельных сетей [Електронний ресурс] / С. С. Миловидов, Д. Е. Павликов // Новости

электротехники. – 2011. – № 2 (68) – С. 1–3. – Режим доступа: <http://www.news.elteh.ru/arh/2011/68/07.php>.

29. Красников В. И. Аварийные режимы сельских электрических сетей напряжение 0,38 кВ / В. И. Красников // Повышение качества электрификации сельскохозяйственного производства и его электрообеспечения : труды МИИСП. – М., 1981. – С. 63–65.

30. Виноградов А. В. Анализ повреждаемости электрооборудования электротехнических сетей и обоснования мероприятий по повышению надёжности электроснабжения потребителей [Электронный ресурс] / А. В. Виноградов, Р. А. Перьков // Вестник Нижегородского государственного инженерно-экономического института. – 2015. – № 12 (55). – С. 12–21. – Режим доступа: <http://cyberleninka.ru/article/n/analiz>.

31. Лежнюк П. Д. Забезпечення оптимального керування нормальними режимами ЕЕС шляхом підвищення надійності високовольтних введів / П. Д. Лежнюк, І. О. Гунько // Вісник національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут». Серія: Гірництво. – 2014. – № 25. – С. 92–100.

32. Саенко Ю. Л. Исследование причин повреждения трансформаторов напряжения контроля изоляции / Ю. Л. Саенко, А. С. Попов // Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит. – 2011. – № 7 (89). – С. 59–66.

33. Крум Л. А. Методы оптимизации при управлении электроэнергетическими системами / Л. А. Крум. – Новосибирск : Наука, 1981. – 315 с.

34. Зайченко Ю. Дослідження операцій : підручник / Ю. Зайченко. – 4-е вид., перероб. і допов. – К., 2001. – 688 с.

35. Irving M. R. Efficient Newton-Raphson algorithm for load-flow calculation in transmission and distribution networks / M. R. Irving, J. H. Sterling // Proc. IEE Gener., Transm. Distrib. – 1987. – V. 134, No. 5. – P. 325–330.

36. On efficient use of local sources in smart grids with power quality constraints / D. Forner, T. Erseghe, S. Tomasin, P. Tenti // Proc. IEEE Int. Conf. Smart Grid Commun. D. – Gaithersburg, USA, Oct. 2010.

37. Трифонов А. Г. Постановка задачи оптимизации и численные методы ее решения [Электронный ресурс] / А. Г. Трифонов. //



SoftLine Co. – Свободный режим доступа: [http://matlab.exponenta.ru/optimiz/book\\_2/index.php](http://matlab.exponenta.ru/optimiz/book_2/index.php) (дата обращения: 10.09.2016).

38. Кольцов Ю. В. Сравнительный анализ методов оптимизации для решения задачи интервальной оценки потерь электроэнергии / Ю. В. Кольцов, Е. В. Бобошко // Компьютерные исследования и моделирование. – 2013. – Т. 5, № 2. – С. 231–239.

39. A limited memory algorithm for bound constrained optimization / R. N. Byrd [a. o.] // Technical Report NAM-08. – 1994, May.

40. Железко Ю. С. Потери электроэнергии. Реактивная мощность. Качество электроэнергии : руководство для практических расчетов. — М. : ЭНАС, 2009. – 456 с.

41. Nocedal J. Numerical optimization / J. Nocedal, Stephen J. Wright. – New York : Springer-Verlag, 1999. – 634 p.

42. Журахівський А. В. Оптимізація режимів електроенергетичних систем : навч. посіб. / А. В. Журахівський, А. Я. Яцейко. – 2-ге вид., випр. – Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2010. – 140 с.

43. Цирлин А. М. Вариационные методы оптимизации управляемых объектов / А. М. Цирлин, В. С. Балакирев, Е. Г. Дудников. – М. : Энергоатомиздат, 1975. – 447 с.

44. Принцип найменшої дії в електротехніці та електроенергетиці : монографія / [П. Д. Лежнюк, В. В. Кулик, В. В. Нетребський, В. В. Тептя]. – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2014. – 218 с.

45. Lezhnyuk, P. Selfoptimization of Electric Systems Modes as Hamilton Principle Manifestation / P. Lezhnyuk, V. Netrebskiy, // IEEE International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS). – Kyiv, Ukraine, 2014. – P. 21–25.

46. Воронов А. А. Теория автоматического управления. В 2-х ч. Ч. II Теория нелинейных и специальных систем автоматического управления. – М. : Высшая школа, 1986. – 504 с.

47. Sortomme E. Optimal power flow for a system of microgrids with controllable loads and battery storage / E. Sortomme, M. A. El-Sharkawi // Proc. IEEE/PES Power Syst. Conf. Expo. – Seattle, WA, USA, Mar. 2009

48. Гришин А. А. Исследование эффективности метода пчелиного роя в задаче глобальной оптимизации [Электронный ресурс] / А. А. Гришин, А. П. Карпенко // Наука и образование – 2010. – № 8. – С. 1–28. – Режим доступа: <http://technomag.bmstu.ru/doc/154050.html>.

49. Яндульський О. С. Оптиміальне регулювання напруги в розподільній електричній мережі з джерелом розосередженого генерування з урахуванням їх належності одному власнику при використанні резерву активної потужності / О. С. Яндульський, Г. О. Труніна, А. Б. Нестерко // Вісник Кременчуцького національного університету ім. Михайла Остроградського. – 2015. – № 2/91. – С. 50–54.

50. Лежнюк П. Д. Оцінювання впливу джерел відновлюваної енергії на забезпечення балансової надійності в електричній мережі / П. Д. Лежнюк, В. О. Комар, Д. С. Собчук // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2013. – № 6. – С. 10–15.

51. Degeroote L. Fast harmonic simulation method for the analysis of network losses with converter-connected distributed generation / L. Degeroote, L. Vandeveldel, B. Renders // Electric Power Systems Research. – 2010. – № 80. – P. 1332–1340.

52. Katiraei F. Accidental islanding of distribution systems with multiple distributed generation units of various technologies [Електронний ресурс] / F. Katiraei, T. Chang, C. Sun // Symposium «Grid of the Future 2013». – 2013. Boston, MA. Oct. 22. – P. 1–20. – Режим доступу: <http://cigre.wpengine.com/wp-content/uploads/2015/06/QT-Cigre-GridofFuture-Accidental-Islanding-Oct22-2013-Final.pdf>

53. Поляков В. С. Феррорезонанс в сетях с изолированной нейтралью [Електронний ресурс] / В. С. Поляков // Электрические системы и сети. – Режим доступу: <http://esystems.ru>.

54. Лежнюк П. Д. Вплив інверторів СЕС на показники якості електричної енергії в ЛЕС / П. Д. Лежнюк, О. Є. Рубаненко, І. О. Гунько // Вісник Хмельницького національного університету. Серія: Технічні науки. – 2015. – № 2. – С. 134–145.

55. Лежнюк П. Д. Оптимізація секціонування в локальних електричних системах за критерієм втрат електричної потужності з урахуванням відмов / П. Д. Лежнюк, І. О. Гунько, О. Є. Рубаненко // Техніка, енергетика, транспорт АПК. – 2016. – № 2 (94). – С. 90–98.

56. Лежнюк П. Д. Дослідження стану обладнання локальних електричних систем / П. Д. Лежнюк, І. О. Гунько // Контроль і управління в складних системах (КУСС-2014) : XII Міжнарод. наук.-техн. конф. : тези доповідей. – Вінниця, 2014. – С. 137.

57. Кузнецов В. Г. Використання штучної нейронної мережі для визначення характеристик аномальних перенапруг / В. Г. Кузнецов, В. В. Кучанський, Ю. І. Тугай // Праці Інституту електродинаміки Національної академії наук України : збірник наукових праць. – 2012. – Вип. 31. – С. 5–11.

58. Тугай Ю. І. Аналіз умов виникнення ферорезонансних процесів в електричних мережах / Ю. І. Тугай // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». – 2007. – Вип. 596 – С. 132–136.

59. Тугай Ю. І. Моделювання ферорезонансу в трансформаторах напруги з урахуванням ефекту старіння сталі / Ю. І. Тугай, О. Б. Бесараб // Технічна електродинаміка. – 2014. – № 5. – С. 62–64.

60. Тугай Ю. І. Ферорезонансні процеси за паралельної роботи трансформаторів напруги електромагнітного типу / Ю. І. Тугай, О. Б. Бесараб, В. А. Мельничук // Вісник Харківського національного технічного університету ім. П. Василенка. – 2014. – № 153. – С. 57–59.

61. Тугай Ю. І. Модель електромагнітного трансформатора напруги для дослідження ферорезонансних процесів [Електронний ресурс] / Ю. І. Тугай, О. Б. Бесараб // Наукові праці Вінницького національного технічного університету – 2014. – № 4. – Режим доступу: [http://nbuv.gov.ua/jpdf/VNTUV\\_2014\\_4\\_11.pdf](http://nbuv.gov.ua/jpdf/VNTUV_2014_4_11.pdf).

62. Журахівський А. В. Режими роботи трансформаторів напруги в електромережах з ізольованою нейтраллю / А. В. Журахівський, А. Я. Яцейко, Р. Я. Масляк // Електроінформ. – 2009. – № 1. – С. 8–11.

63. Макаренко В. Программная среда моделирования энергосистем PScad / В. Макаренко // Моделирование радиоэлектронных устройств. – 2013. – № 11. – С. 44–48.

64. Реклоузер вакуумный *PBATTEL* [Електронний ресурс] / ООО МК «Возрождение». – Режим доступу : [http://tiu.ru/p96026382-reklouzer-pbatel.htmldescription\\_block](http://tiu.ru/p96026382-reklouzer-pbatel.htmldescription_block).

65. Разъединители наружной установки на 10 кВ: каталог / ЗАО «ЗЭТО». – Великие луки, 2010. – 18 с.

66. AutoLink. Single or three-phase electronic sectionaliser / Product offerings and features. ABB. – 2011.

67. Воротницкий В. Реклоузер – новый уровень автоматизаций и управления ВЛ 6(10) кВ / В. Воротницкий, С. Бузин // Новости электротехники. – 2005. – № 3 (33). – С. 28–31.

68. Буйний Р. О. Методичні рекомендації з побудови схем секціонування розподільних електричних мереж напругою 6–10 кВ / Р. О. Буйний, В. В. Зорін, А. О. Квицинський // Электрические сети и системы. – Київ. – 2015. – № 6. – С. 22–32.

69. Побудова схем секціонування розподільної електричної мережі напругою 6–10 кВ : методичні рекомендації: СОУ-Н ЕЕ 40.1-00100227-99:2014. – К. : ЕЛВО – Україна, 2014. – 42 с. (Офіційне видання)

70. Лежнюк П. Д. Вплив сонячних електричних станцій на напругу споживачів 0,4 кВ / П. Д. Лежнюк, О. Є. Рубаненко, І. О. Гунько // Энергетика: економіка, технології, екологія. – 2015. – № 3(51). – С. 7–13.

71. Лежнюк П. Д. Дослідження впливу ВДЕ та секціонування на режими роботи локальних електричних систем [Електронний ресурс] / П. Д. Лежнюк, І. О. Гунько // Наукові праці Вінницького національного технічного університету. – 2016. – № 2.

72. Оптимізація секціонування в локальних електричних мережах з різнотипними розподіленими джерелами енергії / П. Д. Лежнюк, І. О. Гунько, О. Є. Рубаненко, Ю. В. Малогулко // Техніка, енергетика, транспорт АПК. – 2016. – № 3 (95). – С. 199–205.

73. Лежнюк П. Д. Оптимізація місць секціонування в локальних електричних системах енергопостачальних компаній / П. Д. Лежнюк, І. О. Гунько // Контроль і управління в складних системах (КУСС-2016) : XIII Міжнарод. наук.-техн. конф. : тези доповідей. – Вінниця, 2016. – С. 191–193.

74. Мусаев Т. Методика выбора оптимальной точки деления городской распределительной сети напряжением 6(10) кВ / Т. А. Мусаев // Энергетика Татарстана. – 2013. – № 2 (30). – С. 38–41.

75. Мельников Н. А. Матричный метод анализа электрических сетей / Н. А. Мельников. – М. : Энергия, 1996. – 120 с.

76. Дьяконов В. П. *Mathcad 2000* : учебный курс / В. П. Дьяконов. – СПб : Питер, 2000. – 592 с.

77. Оптимізація режимів електричних мереж з малими ГЕС в умовах адресного електропостачання / П. Д. Лежнюк, В. В. Кулик, О. Б. Бурикін, О. А. Ковальчук // Технічна електродинаміка. Тематичний випуск: Проблеми сучасної електротехніки. – 2010. – Ч. 3. – С. 31–34.

78. Оптимізація потужності гідроелектростанцій в локальній електричній системі з урахуванням чутливості втрат потужності в ній / П. Д. Лежнюк, І. О. Гунько, О. Є. Рубаненко, О. І. Казьмірук // Sciences of Europe. Technical science (Praha). – 2016. – №. 6 (6). – С. 28–38.

79. Лежнюк П. Д. Аналіз чутливості оптимальних рішень в складних системах критеріальним методом : монографія / П. Д. Лежнюк. – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2003. – 131 с.

80. Астахов Ю. Н. Применение критериального метода в электроэнергетике / Ю. Н. Астахов, П. Д. Лежнюк. – К. : УМКВО. – 1989. – 137 с.

81. Бурикін О. Б. Оптимальне керування відновлюваними джерелами енергії в локальних електричних системах / О. Б. Бурикін, Ю. В. Малогулко, Ю. В. Томашевський, Н. В. Радзієвська // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – № 4. – 2016. – С. 69–74.

82. Розенвассер Е. Н. Чувствительность систем управления / Е. Н. Розенвассер, Р. М. Юсупов. – М. : Наука, 1981. – 464 с.

83. Баженов В. А. Використання методів лінійного програмування для оптимізації розвитку електричних мереж сучасних енергосистем / В. А. Баженов // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2016. – № 2. – С. 93–96.

84. Козирський В. В. Аналіз впливу відхилень вихідних даних на вибір оптимальної кількості секціонуючих пристроїв у розподільних мережах / В. В. Козирський, О. Б. Гай // Електрифікація та автоматизація сільського господарства. – 2003. – № 3. – С. 10–18.

85. Козирський В. В. Вибір оптимальної кількості секціонуючих пристроїв для розподільних мереж напругою 10 кВ / В. В. Козирський, О. В. Гай // Електрифікація та автоматизація сільського господарства. – 2004. – № 2. – С. 12–20.

86. Nyams D. CurveExpert Basic: Release 1.4 [Електронний ресурс] / D. Nyams. 2010. – 77 с. – Режим доступу: [https://docs.curveexpert.net/curveexpert/basic/\\_static/CurveExpert.pdf](https://docs.curveexpert.net/curveexpert/basic/_static/CurveExpert.pdf).

87. Ферстер Э. Методы корреляционного и регрессионного анализа / Э. Ферстер, Б. Ренц. – М. : Финансы и статистика, 1983. – 120 с.

88. ГОСТ 12109–97. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения.

89. Технічна експлуатація електричних станцій і мереж. Правила: ГКД 34.20.507 – 2003. / М-во палива та енергетики України. – К. :

ГРІФРЕ, 2003. – 597 с. – (Нормативний документ Мінпаливенерго України. Правила).

90. Лежнюк П. Д. Оптимальне керування малими ГЕС потоків потужності в електричних мережах з розосередженим генеруванням / П. Д. Лежнюк, О. А. Ковальчук, І. О. Гунько // Відновлювана енергетика та енергоефективність у XXI столітті : XVII Міжнарод. наук.-практ. конф. : матеріали конференції. – Київ, 2016. – С. 430–434.

91. Звіт про результати діяльності Національної комісії, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг, у 2015 році. Постанова НКРЕКП № 515 від 31.03.2016. [Електронний ресурс]. – К. : НКРЕКП, 2016. – 154 с. – Режим доступу: [http://www.nerc.gov.ua/data/filearch/Catalog3/Richnyi\\_zvit\\_2015.pdf](http://www.nerc.gov.ua/data/filearch/Catalog3/Richnyi_zvit_2015.pdf).

92. Про встановлення на квітень 2016 року єдиних роздрібних тарифів на електричну енергію, що відпускається для кожного класу споживачів, крім населення, населених пунктів та зовнішнього освітлення, на території України. Постанова НКРЕКП № 491 від 25.03.2016. [Електронний ресурс] – К : НКРЕКП – Режим доступу: <http://www.nerc.gov.ua/id=19375>.

93. Fundamentals of PSCAD and General Applications. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [http://www.nayakcorp.com/Getting\\_Started42.ppt](http://www.nayakcorp.com/Getting_Started42.ppt).

94. Оптимізація режимів електричних мереж з малими ГЕС в умовах адресного електропостачання / П. Д. Лежнюк, В. В. Кулик, О. Б. Бурикін, О. А. Ковальчук // Технічна електродинаміка. Тематичний випуск: Проблеми сучасної електротехніки. – 2010. – Ч. 3. – С. 31–34.

95. Chakraborty S. A review of power electronics interfaces for distributed energy systems towards achieving low-cost modular design / S. Chakraborty, B. Kramer, B. Kroposki // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2009. – № 13. – С. 2323–2335.

96. Future electronic power distribution systems. A contemplative view / D. Boroyevich, I. Cvetković, D. Dong, R. Burgos, F. Wang, F. Lee // 12<sup>th</sup> International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipmen. – 2010. – С. 1369–1380.

97. Design of Robust Control and Monitoring System for Microgrid Stabilization / S. Vachirasricirikul, I. Ngamroo, S. Kaitwanidvilai, T. Chaiyatham // 6th International Conference on Electrical Engineer-

ing/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology. – 2009. – С. 21–25.

98. Hartono B. Review of Microgrid Technology / B. Hartono, R. Setiabudy // International Conference on QiR. – 2013. – С. 127–132. DOI: 10.1109/QiR.2013.6632550.

99. Grid impedance monitoring system for distributed power generation electronic interfaces / S. Cobreces, E. J. Bueno, D. Pizarro, F. J. Rodriguez, F. Huerta // IEEE transaction on instrumentation and measurement. – № 9. – 2009. – С. 3112–3121. – DOI: 10.1109/TIM.2009.2016883.

100. Peng F. Z. Control and protection of power electronics interfaced distributed generation systems in a customer-driven microgrid [Электронный ресурс] / F. Z. Peng, Y. W. Li, L. M. Tolbert // IEEE. – 2009. – Режим доступа: <https://pdfs.semanticscholar.org/b96a/0a2c.pdf>.

101. Hierarchical control of droop-controlled AC and DC microgrids a general approach toward standardization / J. M. Guerrero, J. C. Vasquez, J. Matas, L. de Vicuña, M. Castilla. // IEEE transactions on industrial electronics. – № 1. – 2011. – С. 158–172. DOI: 10.1109/TIE.2010.2066534.

*Наукове видання*

**Лежнюк Петро Дем'янович  
Рубаненко Олександр Євгенійович  
Гуцько Ірина Олександрівна**

**ОПТИМІЗАЦІЯ РЕЖИМІВ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ  
З ВІДНОВЛЮВАНИМИ ДЖЕРЕЛАМИ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ**

Монографія

Редактор С. Малішевська  
Оригінал-макет підготовлено І. Гуцько

Підписано до друку 18.12.2017 р.  
Формат 29,7×42¼. Папір офсетний.  
Гарнітура Times New Roman.  
Друк різнографічний. Ум. др. арк. 9,47.  
Наклад 300 (1-й запуск 1–75) пр. Зам № В2017-32

Вінницький національний технічний університет,  
ІРВЦ ВНТУ,  
21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95,  
ВНТУ, ГНК, к. 114.  
Тел. (0432) 65-18-06.  
**press.vntu.edu.ua**; *email*: kivc.vntu@gmail.com.

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.