

# SMART GRID СИСТЕМИ ТА ТЕХНОЛОГІЇ SMART GRID SYSTEM AND TECHNOLOGY

УДК 621.314

С.П. Денисюк, д-р техн. наук, проф., ORCID 0000-0002-6299-3680  
Д.Г. Дерев'янюк, канд. техн. наук, доц., ORCID 0000-0002-4877-5601  
Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»  
Д.С. Горенко, викладач, ORCID 0000-0002-7879-7801  
Васильківський фаховий коледж  
Національного авіаційного університету

## ОСОБЛИВОСТІ ОЦІНЮВАННЯ РЕЖИМІВ ФУНКЦІОНУВАННЯ ЛОКАЛЬНИХ СИСТЕМ З ДЖЕРЕЛАМИ РОЗОСЕРЕДЖЕНОЇ ГЕНЕРАЦІЇ ТА НАКОПИЧУВАЧАМИ

*Розглянуто структуру локальних електроенергетичних систем з джерелами Розосередженої Генерації. Представлено основні моделі зазначених систем. Представлено детальну класифікацію ланки генерації локальних електроенергетичних систем з джерелами розосередженої генерації котра містить основні характеристики генераторів. Проаналізовано різноманітні засоби накопичення електроенергії та особливості їх застосування. Виокремлено основні типи накопичувачів, котрі містять пристрої накопичення електричної енергії з використанням конденсаторів та суперконденсаторів, пристрої механічного накопичення енергії, пристрої накопичення хімічної енергії, пристрої зберігання теплової енергії. Ретельно проаналізовано енергетичні процеси у електроенергетичних системах з джерелами розосередженої генерації та накопичувачами електричної енергії шляхом оцінювання величин та знаків обмінних потужностей у перетинах цих систем. Серед вищевказаних процесів: несинусоїдні режими у перетинах локальних електроенергетичних системах та відхилення частоти при синусоїдних та несинусоїдних режимах роботи. Для оптимізації енергетичних процесів у зазначених системах запропоновано метод візуального відображення технічних та економічних показників, котрий дає змогу комплексно оцінити системи з джерелами розосередженої генерації та різноманітними накопичувачами електричної енергії та процеси в них. Враховуючи особливості структури та процесів функціонування систем з джерелами розосередженої генерації обрано такі критерії, як економічна складова вартості елементів системи, її доступність у зазначеному регіоні, екологічність та термін служби. Для поєднання технічних та економічних критеріїв запропоновано використовувати їх графічне відображення*

**Ключові слова:** розосереджена генерація, локальні електроенергетичні системи, Microgrid, накопичувачі електроенергії, енергетичні процеси

### 1. Вступ

Розвиток сучасних електроенергетичних систем характеризується комбінацією централізованої та розосередженої архітектури. Кожна з систем з відмінним типом архітектури може працювати ізольовано одна від одної або разом в інтегрованих енергетичних системах. Керування процесами у таких системах здійснюється в режимі реального часу шляхом впровадження інтелектуальних систем керування. Розширення технологій розосередженої генерації (РГ) сприяє створенню нових електроенергетичних систем. У таких системах різноманітні джерела генерації працюють у тандемі. Це дає змогу забезпечити умови сумісного функціонування широкого спектру споживачів, котрі не можуть бути забезпечені надійним та безперебійним живленням від централізованої системи або розосереджених технологій окремо. Такі системи характеризуються багаторівневою, інколи складною, структурою. Особливістю функціонування таких систем є те, що зазвичай графіки генерування та споживання в них не співпадають, а задля забезпечення енергетичного балансу та економічної доцільності їх функціонування слід використовувати різноманітні накопичувачі.

Тому актуальною є задача оптимального вибору структури зазначених систем та режимів функціонування їхніх структурних елементів, з урахуванням особливостей функціонування джерел РГ.

### 2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Як зазначено у вступі, розглядаючи електроенергетичні системи з різною архітектурою слід зауважити, що найбільшого розповсюдження джерела РГ зазнали у рамках невеликих локальних електро-

енергетичних систем (ЛЕС) з розосередженою архітектурою, відомих на заході як Microgrid системи [1-9].

Поява нових елементів генерування (джерела РГ) та накопичення електричної енергії (котрі можуть працювати у режимі генерування) у електроенергетичних системах змінюють класичні підходи до оцінювання режимів. Причиною цього є об'єктивні труднощі при використанні класичних методів, пов'язані у зазначених системах з появою двосторонніх потоків потужності котрі були повністю відсутні у класичних системах.

Впровадження джерел РГ характеристика наведена у табл. 1, впливає на ланки розподілу та перетворює їх на активні елементи. Це призводить до необхідності внесення змін (або перегляду та модернізації) у прийнятті стратегії керування, експлуатації та планування структури та режимів ЛЕС [10, 11]. При цьому вплив може мати як позитивний, так і негативний характер, тому доцільно ретельно аналізувати питання приєднання джерел РГ до ЛЕС.

Таблиця 1 - Характеристики джерел РГ на основі НВДЕ

Характеристика	СЕС	ВЕС	МГЕС	Паливні комірки	ГТУ	ПГУ	ДГ
Наявність	Залежно від географ. положення	Залежно від географ. положення	Залежно від географ. положення	Завжди	Завжди	Завжди	Завжди
Вихідний сигнал	Постійний струм	Постійний / змінний струм	Змінний струм	Постійний струм	Змінний струм	Змінний струм	Змінний струм
Керування	Некерований	Некерований	Некерований	Керований	Керований	Керований	Керований
Перетворювач	Перетворювач типу (DC-DC-AC)	Перетворювач типу (AC-DC-AC)	Синхронний або асинхронний генератор	Перетворювач типу (DC-AC)	Немає	Немає	Немає
Вид палива	Енергія Сонця	Енергія вітру	Енергія річок	Енергія хімічних реакцій	Природний та біогаз	Природний та біогаз	Продукти нафтопереробки
ККД	6–20%	1–35%	92–94%	до 85 %	30–45%	20–40%	30–45%
Встановл. потужність	до 1 МВт	0,1-2,5 МВт	до 10 МВт	5 кВт – 5 МВт	0,1-30 МВт	30 кВт – 10 МВт	до 6 МВт
Можливість роботи по графіку	Обмежено	Обмежено	Можливо	Можливо	Можливо	Можливо	Можливо
Рівень ПГ	Немає	Немає	Немає	Немає	Високий	Високий	Високий

Разом з тим, залишається невирішеними питання, пов'язані з аналізом структури та процесів у зазначених системах [1, 3, 6, 7]. Ці питання обумовлені появою нових структурних елементів [3, 4] та особливістю режимів їх функціонування [7, 9].

### 3. Мета та задачі дослідження

Метою дослідження є підвищення ефективності функціонування ЛЕС з джерелами РГ та накопичувачами шляхом розробки та впровадження способу комплексного оцінювання структури та енергетичних процесів у зазначених системах.

Для досягнення мети були поставлені наступні завдання:

1. провести детальний аналіз структури локальних енергетичних систем з джерелами розосередженої

генерації та накопичувачами;

2. проаналізувати особливості застосування та види накопичувачів у локальних системах з джерелами розосередженої генерації;

3. спираючись на структурні особливості локальних енергетичних систем з джерелами розосередженої генерації та накопичувачами, запропонувати спосіб оцінювання енергетичних процесів у зазначених системах;

4. розробити спосіб комплексного оцінювання локальних енергетичних систем з джерелами розосередженої генерації та накопичувачами.

#### **4. Аналіз структури локальних електроенергетичних систем з різнотипними джерелами РГ та накопичувачами**

Більшість джерел РГ під'єднані до мережі за допомогою перетворювачів роду стуму (їхня характеристика наведена у табл. 2). При підключенні ці перетворювачі повинні забезпечувати необхідну якість електричної енергії. Тим не менш, висока частота перемикання вентиляційних елементів в перетворювачах може зумовлювати додаткові гармоніки напруги та струму в ЛЕС та знижувати якість електричної енергії [11–15].

Ланка автономного живлення в ЛЕС на основі джерел РГ, як складова ланки генерації, зазвичай представлена кількома джерелами обмеженої потужності. Її призначення, – робота у відокремленому від загальної мережі режимі, що зазвичай викликає необхідність проводити накопичувальні дії для забезпечення енергетичного балансу:

$$\sum_{i=1}^n W_{Gi} = \sum_{j=1}^m W_{ЛН j}.$$

У деяких джерелах малої потужності, таких як паливні елементи і мікротурбіни, накопичуючі пристрої стають дуже важливими для збалансування потужності системи при незначних коливаннях та/або значних змінах навантаження [11]. У разі раптової зміни стану системи, ці пристрої можуть працювати у якості джерела змінної напруги. В силу своїх фізичних обмежень вони мають обмежений запас енергії, тому до складу ЛЕС повинні бути додані резервні накопичувачі енергії для забезпечення безперервного електропостачання та підвищення рівня надійності.

$$\sum_{i=1}^n P_{Gi} + \sum_{k=1}^t P_{Hk} = \sum_{j=1}^m P_{ЛН j}.$$

Основними технічними засобами акумуляції електричної енергії є:

Гідроакумулювальні електростанції (ГАЕС, Pumped-storage hydroelectricity (PSH), або pumped hydroelectric energy storage (PHES)).

Системи акумулювання такого типу можуть використовуватися у комплексі з вітротурбінними установками [16]. Даний тип систем накопичення (PSH) зберігає енергію механічно. Електроенергія споживається для нагнітання води з нижнього резервуара у верхній резервуар і за необхідності генерується при протіканні води через турбіни у нижній резервуар, подібно до традиційних гідроелектростанцій.

Насосні гідроакумулювальні PSH системи є загальновідомими технологіями накопичення електричної енергії та знайшли широке застосування в Європі. На даний момент, дуже мало насосних гідроакумулюючих установок, які підключені до розподільної мережі в Європі. В майбутньому їх кількість не буде значно зростати, тому що капітальні витрати вищі порівняно з іншими електростанціями, що працюють на природному газі, і необхідні дуже специфічні географічні вимоги.

Середнє значення потужності ГАЕС (PSH) становить близько 1000 МВт (100 МВт – 3000 МВт). ГАЕС (PSH) можна вважати найпопулярнішими серед усіх типів накопичувачів електричної енергії, у тому числі і в системах з джерелами РГ. Це викликано тим, що можливість регулювання вихідних параметрів ГАЕС дає змогу застосовувати ці технології для збалансування графіку навантаження, регулювання частоти та забезпечення резервів потужності [16].

Системи накопичення енергії зі стисненим повітрям (Compressed-air energy storage /CAES).

У системах накопичення енергії зі стисненим повітрям (CAES) енергія зберігається механічно, шляхом запуску електродвигунів для стиснення повітря в закритих об'ємах (при чому виділяється значна кількість теплової енергії). Є три типи систем CAES залежно від того, як вони використовують теплову енергію: адіабатичні, діабатичні та ізотермічні або квазі-ізотермічні.

Середнє значення потужності для CAES систем знаходиться в діапазоні 50–300 МВт [16–17].

CAES накопичує теплову енергію під час стиснення та повертає її, нагріваючи повітря, коли воно

переходить на впускний отвір турбіни. Інший підхід передбачає стиснення та розширення повітря через це температура підтримується фактично сталою. Основними перешкодами для розповсюдження даної технології є високі капітальні витрати та специфічні вимоги до місця розташування. Також дуже часто для компресорів потрібне первинне джерело палива, таке як природний газ. Технології CAES є більш поширеними в США.

Таблиця 2 - Характеристика системи перетворення в ЛЕС з джерелами РГ на основі пристроїв СЕ

Тип перетворення*	Призначення	Вид перетворювача	Галузь застосування
AC-AC	Коригування рівня вихідної напруги змінного струму у відповідності з рівнем вхідної напруги змінного струму. Змінний кут включення вентиля контролює вихідну напругу. Ці перетворювачі відомі як регулятори напруги змінного струму.	Циклоконвертори, гібридні матричні перетворювачі, матричні перетворювачі, перетворювачі частоти, перетворювачі-регулятори напруги	СК Освітлення /Опалення, двигуни великої потужності, зміна рівня напруги / частоти,
AC-DC	Перетворювач параметрів змінного струму в постійний може перетворювати змінну напругу в напругу постійного струму. Вихідна напруга постійного струму може регулюватися шляхом зміни кута запалювання тиристорів. Вхідна напруга змінного струму може бути одно- або трифазною.	Випрямлячі (одно- або трифазний, напівмостовий або мостовий)	Машини постійного струму, сис-ми накопичення енергії, джерела РГ, лінії передачі ПС (HVDC)
DC-AC	Різні рівні вихідної змінної напруги, частоти і фази; регулювання потужності в залежності від конструкції конкретного пристрою та вхідної потужності на стороні постійного струму	Інвертор (інвертор струму, інвертор напруги, резонансний інвертор)	Двигуни змінного струму, UPS, локомотиви, Static Var Generation, СЕС або паливні комірки
DC-DC	Такі перетворювачі використовуються для регулювання вихідної напруги постійного струму щодо вхідної напруги постійного струму. Змінний цикл роботи контролює вихідну напругу.	Завантажувальні перетворювачі (Boost Converters), Buck-Boost Converters, Chopper, Cuk Converters	Живлення електронного обладнання, робототехніка, автомобілі/транспорт, підсилювачі, СЕС
AC-DC-AC	AC / DC / AC перетворювачі, а саме перетворювачі з ланкою постійного струму, виконують перетворення вхідного змінного струму до параметрів вихідного змінного струму за допомогою ланки постійного струму між ступенями перетворення (випрямляч, ланка постійного струму та інвертор)	Перетворювач типу Back to Back, перетворювач типу випрямляч - інвертор	Для одинарного або комплексного використання різних ел. генераторів, джерела РГ, ЛЕС

\* AC – параметри змінного струму (alternating current), DC – параметри постійного струму (direct current).

Маховики

Маховик – масивне колесо, яке обертаючись зберігає електроенергію у вигляді кінетичної енергії. Маховик приводиться в дію електродвигуном-генератором (ЕДГ), що виконує перетворення електричної енергії у кінетичну і навпаки Щоб мінімізувати втрачену під час обертання та тертя енергію, маховики часто поміщають всередину вакуумного контейнера.

Ротор є основним компонентом маховика. Роторні характеристики, такі як інерція та максимальна швидкість обертання, визначають енергетичну ємність і щільність приладів. ЕДГ і пов'язана з ним СЕ, визначають максимальну потужність маховика, що дозволяє відокремити енергетичні та електричні потужності. Енергоресурси маховиків незалежні, і це дає змогу оптимізувати різні параметри через застосування накопичувача енергії.

Накопичувачі на основі маховиків сприяють збільшенню частки вітрової та сонячної енергетики в енергетичних системах підвищуючи стійкість таких систем. Коливання потужності внаслідок сонячних та вітрових джерел компенсуються за рахунок зберігання енергії у сонячний або вітряний періоди, і вони постачаються назад при потребі. Накопичувачі на основі маховиків можуть застосовуватись для згладжування коливань викликаних змінами вітрових потоків. Інше їх застосування, – регулювання частоти мережі. У СЕС вони можуть бути інтегровані у системи накопичення на основі акумуляторних батарей для покращення вихідного сигналу та продовження строку служби акумуляторних батарей.

Основні характеристики маховиків: високий життєвий цикл, довгий паспортний термін служби (більше 20 років), швидка реакція на коливання потужності у системі, висока ефективність, можливість швидко заряджатися та віддавати енергію, висока щільність потоку енергії та мінімальний вплив на навколишнє середовище.

Основними перевагами технології використання маховиків є: швидкий час реагування та значна інерційність для стабілізації мережі, тривалий термін експлуатації та дуже низькі вимоги до експлуатації та обслуговування. Головним бар'єром до широкого впровадження даної технології є високі інвестиційні витрати.

Електрохімічні акумуляторні батареї (Battery Energy Storage Systems (BESS)).

Даний тип накопичувачів відноситься до електрохімічних технологій зберігання енергії, які перетворюють електроенергію на хімічний потенціал для зберігання, а потім назад до електроенергії. Батареї можна розбити на три основні категорії:

- звичайні акумулятори, які складені з осередків, які містять два електроди (наприклад, свинцеву кислоту, іон літію);
- високотемпературні акумулятори, що зберігають електроенергію в розплавленій солі (наприклад, NAS);
- батареї, які використовують електролітні рідини в ємностях (наприклад, Zn / Br Redox, FE / Cr Redox).

Основні характеристики електрохімічних акумуляторних батарей: велика потужність, електроліт можна легко замінити, висока швидкодія при переході від режиму заряду до режиму розряду (приблизно 1 мс), низький коефіцієнт корисної дії (ККД). У накопичувальній системі немає самостійного розряду, оскільки електроліти не можуть реагувати, коли вони зберігаються окремо. Основні характеристики BESS систем наведено у табл. 3 [18–23].

Отже, електрохімічні акумуляторні батареї мають широкий спектр застосування та ряд переваг, серед яких: дуже швидкий час реагування та високу ефективність, але при цьому вони мають досить високі капітальні витрати.

Звичайно, перш ніж впроваджувати використання такого типу накопичувачів слід розробити інструменти аналізу для вивчення технічної та економічної доцільності інтеграції їх в електричні мережі.

#### *Паливні комірки*

Паливні комірки [21] відноситься до накопичувачів, принцип дії яких полягає у зберіганні/накопиченні хімічної енергії, а саме використання електричної енергії для створення палива, яке може спалюватися на звичайних електростанціях. Основним паливом є синтетичний метан (і в деякій мірі водень). Процедура складається з двох етапів:

1. Електроенергія використовується для електролізу, щоб розділити воду на водень та кисень.
2. Водень реагує з діоксидом вуглецю для створення метану.

Метан є основною складовою природного газу, тому його можна вводити в існуючу інфраструктуру газотранспортних та розподільчих систем (хабів та сховищ природного газу). Висока ємність газосховищ може потім використовуватися для зберігання в середньостроковій і довгостроковій перспективі.

Проаналізувавши вище викладене та [17–23], можна виокремити відповідні типи пристроїв накопичення електричної енергії:

- гідроакумуляційні електростанції (ГАЕС та МГАЕС);
- системи накопичення енергії зі стисненим повітрям (*Compressed-air energy storage / CAES*);
- маховики;
- електрохімічні акумуляторні батареї;
- паливні комірки.

Технології накопичення електроенергії також можна класифікувати за формою накопичення:

1. Накопичення електричної енергії з використанням конденсаторів та суперконденсаторів.
2. Механічне накопичення енергії: накопичення кінетичної енергії; зберігання потенційної енергії.

3. Накопичення хімічної енергії: зберігання електрохімічної енергії (звичайні батареї); зберігання хімічної енергії (паливні елементи, розплавлені карбонатні паливні елементи – MCFC та батареї Metal-Air); зберігання термохімічної енергії.

Таблиця 3 - Характеристика накопичувачів електроенергії

Характеристика	Тип накопичувача															
	PHE S	CA ES	Lead-acid	Ni-Cd	Ni-Mh	Li-Ion	NaS	Zebra	VRB	Zn Br	Metal-air Battery	Маховики	SMES	Суперконденсатори	Паливні комірки	TES
Потужність (МВт)	100-5000	1-400	0,001-50	0-46	0,01 до ~ МВт	0,1-50	0,05-34	0,001-1	0,005-1,5	0,025-1	0,02-10	0,002-20	0,01-10	0,001-10	0,00001-50	0,1-300
Тривалість розряду	10-100	2-100	год.	сек. - год.	сек. - год.	0,1-5	5-8	хв. - 8 год.	сек. - 8 год.	сек. - 4 год.	3-4	сек. - 15 хв.	сек.	сек.	сек. - 24+	1-24 год.+
ККД	70-87 %	40-80 %	70-92 %	60-70%	60-66 %	85-90%	75-90%	~90 %	65-85 %	75-80 %	40-60 %	80-99%	85-99 %	97%+	20-70%	30-60%
Строк служби (років)	40-100	20-100	5-15 (~10)	5-20	3-15	5-20	15	8-14	10-20	5-20	-	15-20	20+	20+	5-15	10-40
Строк служби (циклів)	12000-30000+	30000+	500-12000	1000-2500	200-1500	1000-10000	2000-5000	2500-3000	13000+	~2000	1000-3000	1000000	100000+	100000+	100-10000	2000-14000

4. Зберігання теплової енергії: зберігання низькотемпературної енергії; високотемпературне зберігання енергії (теплові системи, такі як акумулятори пари або гарячої води, графіт, бетон, приховані системи тепла).

Таблиця 4 - Порівняння технічних характеристик накопичувачів електричної енергії (ESS)

Системи	Потужність та час розряду		Тривалість зберігання		Капітальна вартість	
	Номінальна потужність	Час розряду	Самостійна розрядка в день	Відповідна тривалість зберігання	\$/кВт	\$/кВтгод
ГАЕС	100–5000 МВт	1–24 г+	Дуже мала	Години – місяці	600–2000	5–100
CAES	5–300 МВт	1–24 г+	Мало	Години – місяці	400–800	2–50
Свинцево-кислотні акумулятори	0–20 МВт	Секунди-години	0.1–0.3 %	Хвилини – дні	300–600	200–400
NiCd	0–40 МВт	Секунди-години	0.2–0.6 %	Хвилини – дні	500–1500	800–1500
NaS	50 кВт–8 МВт	Секунди-години	~20 %	Секунди-години	1000–3000	300–500
Літій-іонні акумулятори	0–100 кВт	Хвилини-години	0.1–0.3 %	Хвилини – дні	1200	600–2500
Паливні елементи	0–50 МВт	Секунди – 24 год+	Майже нуль	Години – місяці	10,000+	
Аморфні метали	0–10 кВт	Секунди – 24 год+	Дуже мала	Години – місяці	100–250	10–60
SMES	100 кВт–10 МВт	Мілісекунди – 8с	10–15 %	Хвилини – години	200–300	1000–10,000
Маховики	0 – 250 кВт	Мілісекунди	100 %	Секунди – хвилини	250–350	1000–5000

Разом з системою накопичення електроенергії важливу роль в структурі ЛЕС відіграють пристрої силової електроніки (СЕ), які забезпечують перетворення енергії в ЛЕС та керування режимами. Стратегія керування полягає в тому, що ЛЕС зазвичай працює паралельно до загальної електричної мережі. У разі виникнення будь-яких аварійних ситуацій в мережі або її планового обслуговування ЛЕС може бути

відключена від мережі і продовжувати працювати в острівному режимі і навпаки. ЛЕС на рівні розподілу зазвичай характеризується необхідністю перетворення енергії від НВДЕ. Для забезпечення надійної та стабільної роботи ЛЕС використовуються різні типи перетворювачів на базі пристроїв СЕ та накопичувачів. Їх типи та характеристики наведені в табл. 2, 4. Зазвичай номінальна пікова потужність ЛЕС обмежується 10 МВА. Тому інтерфейс, який забезпечує взаємодію ЛЕС і загальної мережі, відіграє важливу роль, а спосіб перемикання та СК цього компонента визначає ефективність взаємодії з зовнішньою енергосистемою.

На ряду з системою перетворення розподільна мережа має важливу роль, як складова частина ЛЕС. Розподільні мережі можуть класифікуватись за трьома типами: лінії постійного струму; лінії змінного струму промислової частоти; височастотні лінії змінного струму (High Frequency AC – HFAC).

У випадку лінії змінного струму промислової частоти джерела РГ приєднуються до головної шини в ЛЕС. Постійний струм від джерел РГ перетворюється в змінний промислової частоти 50 Гц за допомогою відповідного інвертора і потім передається на навантаження.

Навантаження підключається до розподільної мережі, яка може гарантувати ефективну взаємодію ланки генерації і розподільної мережі. При більш високій частоті гармоніки більш високого порядку відфільтровуються, що обмежує проблеми якості енергії. Але недоліком є те, що HFAC підвищує реактивний опір лінії і збільшує втрати потужності.

Отже, проаналізувавши усе вищезазначене, в ЛЕС можна виділити наступні структурні складові:

- система генерації ЛЕС, що розрахована на повне покриття локального навантаження (табл. 5);
- ланка перетворення та накопичення електроенергії, що в окремому випадку може бути складовою системи генерації;
- ланки розподілу та система керування;
- локальне навантаження.

Таблиця 5 - Характеристика джерел живлення в ЛЕС

Тип джерела	Види джерел	Форми напруг та струмів джерела	Вихідна потужність	Перетворення	Режим роботи
Загальна електрична мережа		$\begin{cases} u(t) = U_0 + \sum_{k=1}^n U_k \\ i(t) = I_0 + \sum_{k=1}^{n,m} I_k \end{cases}$	$P = P_1 + P_\infty$ $\frac{dP}{dt} = \text{var} \Rightarrow$ керовано	Трансформатор, $U_1 / U_2$ AC-DC	1.Режим централізованої генерації повинен постійно покривати графік навантаження
Джерела РГ з перетворювачами	ВЕС, СЕС, МГЕС, паливна комірка	$\begin{cases} U_0, I_0, \text{дж. НВДЕ} \\ u(t) = U_0 + \sum_{k=1}^n U_k \\ i(t) = I_0 + \sum_{k=1}^{n,m} I_k \end{cases}, \text{ДГ...}$	$P = P_1 + P_\infty$ $\frac{dP}{dt} = \text{var} \Rightarrow$ не керовано	AC-DC-AC, DC-DC-AC,	1.Режим енергоострова з акумулюванням енергії 2. Паралельна робота з мережею та безперервна генерація
Джерела РГ на основі СМ / АМ	Когенераційні уст-ки, ДГ, МГЕС, ВЕС	$\begin{cases} u(t) = \sum_{k=1}^n U_k \\ i(t) = \sum_{k=1}^{n,m} I_k \end{cases}$	$P = P_1 + P_\infty$ $\frac{dP}{dt} = \text{var} \Rightarrow$ керовано	СМ, АМ, AC-DC	1.Режим енергоострова – резервне живлення у випадку відключення від загальної мережі 2.Паралельна робота для покриття пікових навантажень / видача ел. ен. в мережу
Джерела РГ постійного струму (в т.ч. акумулятори)	СЕС, ВЕС, паливні комірки; батареї, маховики та суперконденсатори	$U_0, I_0$	$\frac{dP}{dt} = \text{var} \Rightarrow$ керовано	DC-DC-AC, AC-DC-AC	1.Режим енергоострова з акумулюванням енергії 2.Паралельна робота з мережею та, безперервна генерація

Розглядаючи типи джерел у системі генерації ЛЕС, а також режими їхньої роботи (табл. 5), очевидним стає поява режимів паралельної роботи з мережею та генерації електричної енергії у мережу. Саме ця особливість притаманна саме ЛЕС з накопичувачами повинна враховуватися при подальшому аналізі енергетичних процесів у зазначених системах.

### 5. Оцінювання енергетичних процесів у Локальних електроенергетичних системах з різнотипними джерелами РГ та накопичувачами

При роботі ЛЕС з джерелами РГ та накопичувачами виникають певні проблеми. Серед них: проблема

оптимального використання електроенергії, проблема неурівноваженості напруги між генераторами та споживачами електроенергії, проблема оцінки якості електроенергії (електромагнітної сумісності) та проблема усунення негативних взаємних впливів [11]. Зважаючи на це, для вирішення оптимізаційної задачі підвищення якості та енергоефективності у структурі ЛЕС слід проводити аналіз складових додаткових втрат. Даний аналіз може ґрунтуватися на оцінюванні величини потужності Фризе  $Q_F$ , та обмінних процесів у ЛЕС на основі обмінної потужності  $Q_{OB}$  ( $Q_{EX}$ ) [11]. Для аналізу обмінних процесів використовують модифікації обмінної потужності, за базове визначення якої, використовуємо співвідношення:

$$Q_{OB} = \frac{1}{T} \int_0^{t^+} u(t) i_r(t) dt, \quad (1)$$

де  $t^+$  – інтервал часу, що відповідає додатній величині відбору активної потужності від генерації на інтервалі  $T$ ;  $u(t)$  – напруга у виділеному перетині ЛЕС;  $i_r(t) = i(t) - i_a(t)$  – реактивна складова струму;  $i_a(t) = u(t)P / U^2$  – активна складова струму;  $i(t)$  – повний струм в гілці;  $P$  – активна потужність;  $U$  – діюче значення напруги.

*Несинусоїдальність у перетині ЛЕС*

За умови, що в перетині довільної електротехнічної системи всіма джерелами генерується несинусоїдальна напруга  $e(t)$ , то і струм в даному перетині буде несинусоїдальний  $J(t)$  (рис. 1).

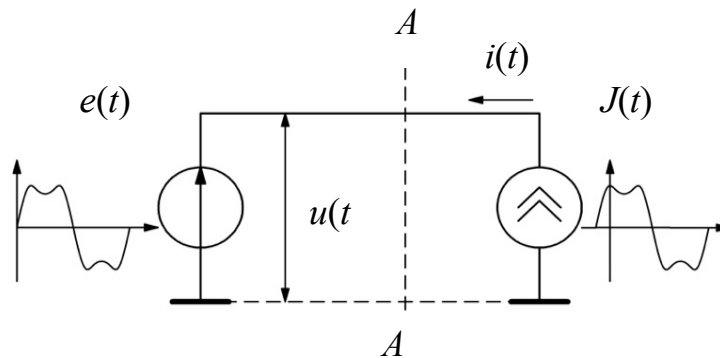


Рис. 1. Еквівалентна модель перетину ЛЕС

В залежності від конфігурації системи еквівалентний струм та напруга в результаті можуть мати як однаковий, так і різний гармонічний склад. Для прикладу розглянемо два варіанти наведені в табл. 6. Для оцінки енергетичних процесів у випадку однакового гармонічного складу можна використовувати реактивну потужність Будеана:

$$Q_B = \sum_{v=1}^N Q_v = \sum_{v=1}^N U_v I_v \sin(\varphi_v), \quad (2)$$

де  $v$  – порядок гармонічної складової.

Таблиця 6 - Варіанти гармонічного складу струму та напруги в перетині ЛЕС

Тип сигналу	Математичний опис сигналу	Вигляд залежності
Однаковий гармонічний склад	$u(t) = u_{(1)}(t) + u_{(3)}(t);$ $i(t) = i_{(1)}(t) + i_{(3)}(t).$	Рис. 2
Різний гармонічний склад	$u(t) = u_{(1)}(t) + u_{(3)}(t);$ $i(t) = i_{(1)}(t) + i_{(5)}(t).$	Рис. 3

Для однакового та різного гармонічного складу струму та напруги в перетині електротехнічної системи реактивна потужність Будеана відповідно матиме вигляд:

$$Q_B = Q_1 + Q_3 = U_1 I_1 \sin(\varphi_1) + U_3 I_3 \sin(\varphi_3), \quad (3)$$



$$Q_B = Q_1 + Q_3 + Q_5 = U_1 I_1 \sin(\varphi_1) + U_3 I_3 \sin(\varphi_3) + U_5 I_5 \sin(\varphi_5),$$

$$Q_B = U_1 I_1 \sin(\varphi_1) = Q_1, \quad (4)$$

$$\text{де } U_3 = k_{U3} U_1, I_3 = k_{I3} I_1.$$

Вираз обмінної потужності для  $v$ -ї гармонічної складової визначається зі співвідношення:

$$Q_{OB(v)} = \pm \frac{U_{m(v)} I_{m(v)}}{8\pi} (3 \sin(\varphi_v) - \sin(3\varphi_v)). \quad (5)$$

У виразі (5) знак «+» або «-» залежить від характеру навантаження: активно-ємнісний або активно-індуктивний відповідно.

На рис. 2, 3 представлено залежності реактивної потужності Будеана  $Q_B$  та обмінної потужності  $Q_{OB}$ ,  $Q_{OB(1)}$  для різних коефіцієнтів пульсації в залежності від кута зсуву фаз між струмом та напругою  $\varphi$  відповідно для однакового та різного гармонічного складу.

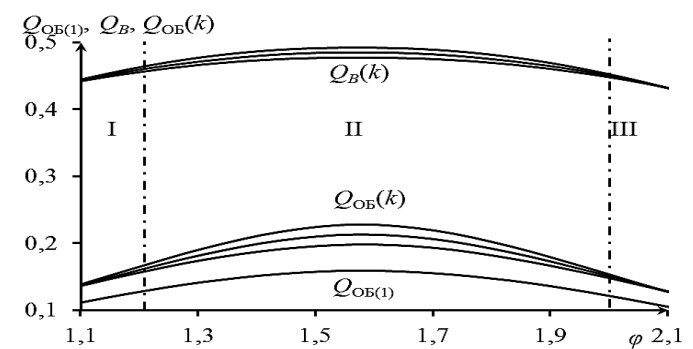


Рис. 2. Залежності  $Q_{OB(1)}$ ,  $Q_B$ ,  $Q_{OB(k)}$  від кута зсуву основної гармонічної складової при однаковому гармонічному складі струму та напруги

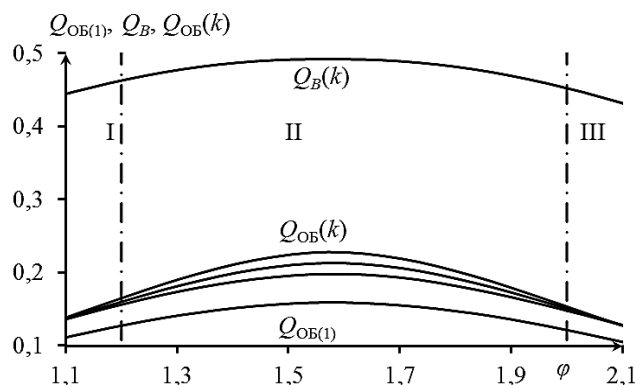


Рис. 3. Залежності  $Q_{OB(1)}$ ,  $Q_B$ ,  $Q_{OB(k)}$  від кута зсуву основної гармонічної складової при різному гармонічному складі струму та напруги

На рис. 2 можна виділити три основні зони. В I та III зоні як реактивна потужність Будеана так і обмінна потужність не змінюється в залежності від коефіцієнту пульсації. В зоні II реактивна потужність Будеана відрізняється лише на 1,5–4% для коефіцієнтів пульсації відповідно 10, 20 та 30%, у той час як обмінна потужність відрізняється на 7–25%. На рис. 3 також явно можна виділити три основні зони. Проте на відміну від залежностей рис. 2 реактивної потужності Будеана  $Q_B$  не залежатиме від коефіцієнтів пульсації, оскільки буде рівною реактивній потужності за першою гармонікою, що впливає з наступного виразу (4).

*Відхилення частоти при синусоїдальних та несинусоїдальних режимах роботи ЛЕС*

Одним з показників якості електроенергії, що на пряму залежить від роботи джерел живлення та їх супутнього обладнання є відхилення частоти. Відповідно до діючих стандартів нормально допустимі та гранично допустимі межі відхилення частоти складають  $\pm 0,2$  Гц та  $\pm 0,4$  Гц [12]. Доцільно оцінити зв'язок

між відхиленням частоти та її впливом на обмінні процеси в системі. Н рис. 4 наведено еквівалентна модель лінійної електротехнічної системи з індуктивно-активним навантаженням.

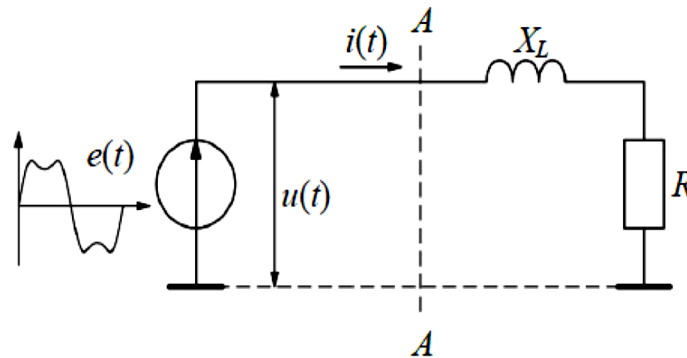


Рис. 4. Модель для оцінки впливу коливань частоти джерела живлення на обмінні процеси в ЛЕС

З врахуванням основних законів електротехніки для випадку електротехнічної системи з індуктивно-активним навантаженням формулу обмінної потужності (5) можна записати у вигляді:

$$Q_{об(v)} = \frac{U_{m(v)}^2 (\sin(3\varphi_{i(v)}) - \sin(\varphi_{i(v)}))}{8v\pi \sqrt{R^2 + (2v\pi(f + \Delta f)L)^2}} \quad (6)$$

Змінюючи коефіцієнт пульсації  $k_{U3}$  від 0 до 25 % побудуємо залежності  $Q_{об}$  від частоти (рис. 5).

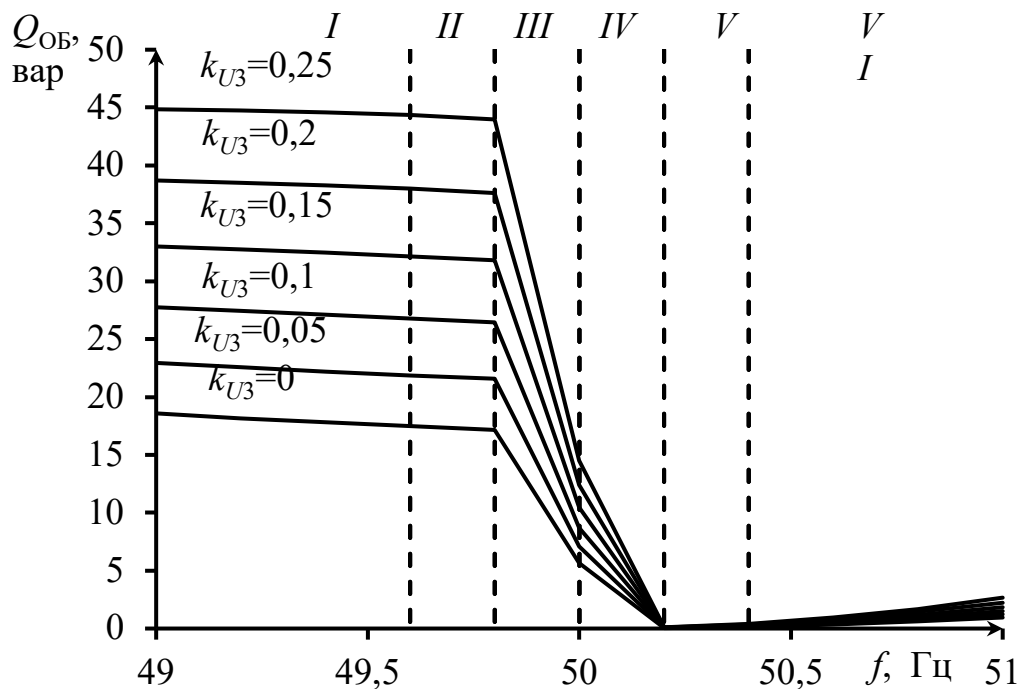


Рис. 5. Залежності обмінної потужності від коливань частоти при різних значеннях коефіцієнтів пульсації

На рис. 5 можна виділити зони, що не відповідають нормам: зона I та VI; зони де коливання частоти відповідають гранично допустимим значенням  $\Delta f = \pm 0,4$  Гц – II та V; зони, що відповідають нормально допустимим значенням  $\Delta f = \pm 0,2$  Гц – III та IV. Як видно з рис. 4 при значеннях коливання частоти менших 49,8 Гц обмінна потужність зростає, це приведе до зміни балансу активних потужностей у Microgrid, що забезпечується при частоті 50 Гц. Незначне зменшення частоти може викликати насичення і як наслідок зростання втрат у сталі і появу вищих гармонік у напрузі. Також зменшення частоти призводить до збільшення механічних втрат в двигунах. Зростання частоти призводить до падіння обмінної потужності в перетині, що пов'язано зі зменшенням періоду дії напруги та взаємною компенсацією основної та третьої гармонічної складових.

## 6. Способи комплексного оцінювання структури та енергетичних процесів у ЛЕС з РГ та накопичувачами

Наведений у попередньому розділі показник разом з показниками якості електричної енергії та надійності слід враховувати при проведенні комплексного аналізу ЛЕС з джерелами РГ та інтегрованими системами накопичення електроенергії. Для виконання даної задачі можуть бути запропоновані різні евристичні та алгоритмічні процедури згортки нескінченного ряду значень у просторовий графічний образ. Виділяють п'ять типів таких когнітивних образів: спіральну, лінійну динамічну, матричну, гармонічну та віялову динамічну ритмограми. Відоме одночасне відображення показників якості електроенергії (ПЯЕ) на одній круговій діаграмі, що дає змогу провести значення ПЯЕ згідно з ГОСТ 13109-97 та [12, 28] за критеріями «Задовільно» чи «Незадовільно».

Можна запропонувати спосіб відображення інформації з метою якісної оцінки значень ПЯЕ, яка є більш широкою, ніж «Задовільно» чи «Незадовільно» (рис. 6). На наведеній діаграмі Шумана встановлено, що:

- область (1) (на діаграмі – 0,3 відносних одиниць (в.о.)) – відповідає оцінці «Дуже добре»;
- область (2) (0,3 – 0,6 в.о.) – відповідає оцінці «Добре»;
- область (3) (0,6 – 1,0 в.о.) – відповідає оцінці «Нормально»;
- область (4) (1,0 – 1,2 в.о.) – відповідає оцінці «Погано».

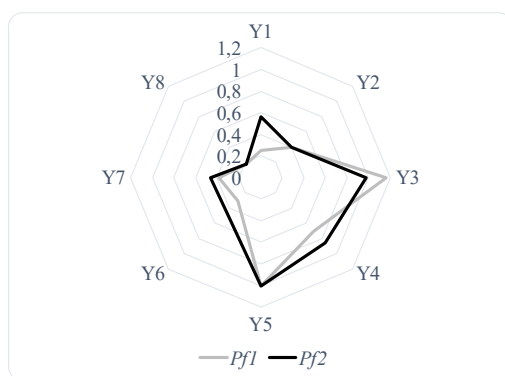


Рис. 6. Графічне відображення величин ПЯЕ в ЛЕС

За допомогою графічних моделей на одній діаграмі можна представити не тільки значення показників ПЯЕ, а й енергетичні характеристики або їхню комбінацію з ПЯЕ. Такі діаграми назвемо «енергетичним профілем» ЛЕС з джерелами РГ та накопичувачами електроенергії.

Розвитком запропонованої моделі візуалізації енергетичних характеристик, з одного боку, може бути відображення пристовіть функцій енергетичних процесів у рамках однієї діаграми, а також більш поглиблений просторовий аналіз характеристик енергетичних процесів у часі та при зміні окремих режимних параметрів системи.

На рис. 6 зображено два енергетичні профілі ЛЕС ( $Pf_1$ ,  $Pf_2$ ), котрі відображають два різних стани ЛЕС. Шкали показників градовані у відносних одиницях.

$Pf_2$  (табл. 7), котрий містить «покращені» показники, хоча і має в окремих випадках значення гірші, ніж  $Pf_1$ , проте вся сукупність показників  $Pf_2$  не виходить за межі області «Нормально», на відміну від  $Pf_1$ . Це свідчить про більш якісний стан процесів в описаній ЛЕС.

Таблиця 7 - Розрахункові значення профілів ЛЕС

Нормалізоване значення	$SAIDI$	$SAIFI$	$MAIFI$	$U$	$f$	$ENS$	$Q_{EX}$	$THD$
$Pf_1$	0,25	0,4	1,16	0,7	1,001	0,3	0,38	0,18
$Pf_2$	0,56	0,4	0,98	0,85	1,0008	0,45	0,46	0,18

Розширена множина показників та запропонований спосіб візуалізації дають змогу враховувати структуру та усталені режими роботи ЛЕС при комплексній оцінці їх стабільності та надійності.

## 7. Обговорення результатів дослідження щодо оцінювання режимів функціонування локальних систем з джерелами розосередженої генерації та накопичувачами

Як видно з розділу 5 (рис. 2–4), обрані авторами показники для оцінювання енергетичних процесів (вирази (1) – (6)) у ЛЕС з джерелами РГ та накопичувачами є дійсно універсальними зважаючи на структуру зазначених систем. Універсальність даних показників підтверджується можливістю врахування

двосторонніх потоків потужності, котрі виникають при появі джерел РГ та накопичувачів.

Разом з тим особливістю запропонованого способу комплексного оцінювання ЛЕС з джерелами РГ та накопичувачами (розділ б) є те, що він дає змогу у рамках однієї діаграми відображати різні за своєю суттю показники.

Спосіб комплексного оцінювання ЛЕС з джерелами РГ полягає у складанні «енергетичного профілю» ЛЕС та його графічного відображення. Обмеженням отриманих результатів є те, що у рамках запропонованого способу комплексного оцінювання ЛЕС з джерелами РГ, є недостатнє розкриття усіх можливих комбінацій кількісних та якісних, а також технічних, економічних та інших типів показників у рамках даного дослідження. Разом з тим, саме вибір оптимальних показників та їх комбінацій, з урахуванням структури ЛЕС, може стати основою для подальших наукових досліджень.

### **Висновки**

1. Проведено детальний аналіз структури локальних енергетичних систем з джерелами розосередженої генерації та накопичувачами. Даний аналіз дає змогу чітко виокремити усі структурні складові зазначених систем. Це в свою чергу стало підґрунтям до вибору методів аналізу енергетичних процесів локальних енергетичних систем з джерелами розосередженої генерації та накопичувачами

2. На основі проведеного аналізу було класифіковано накопичувачі електричної енергії, котрі можуть застосовуватися у локальних енергетичних систем з джерелами розосередженої генерації. Дана авторами класифікація спирається, як на різні типи накопичувачів так і на способи накопичення енергії і враховує особливості застосування у ЛЕС з джерелами РГ.

3. Спираючись на структурні особливості локальних енергетичних систем з джерелами розосередженої генерації та накопичувачами, запропоновано спосіб оцінювання енергетичних процесів. Даний спосіб базується на оцінках обмінних потужностей у перетинах зазначених систем з урахуванням особливостей їх структури.

4. Для підвищення ефективності функціонування ЛЕС з джерелами РГ та накопичувачами запропоновано спосіб комплексного оцінювання зазначених систем. Даний спосіб спирається на методи візуального відображення технічних та економічних показників і дає змогу у рамках однієї діаграми відображати різні за своєю суттю показники.

### **REFERENCES**

1. E. Hossain, E. Kabalci, R. Bayindir, R. Perez, "Microgrid testbeds around the world: State of art", *Energy Conversion and Management*, vol. 86, pp. 132-153, October 2014.
2. *Microgrid Deployment Tracker 4Q12*", Pike Research Report, 2012. Sadrul Ula, T. S. Kalkur, Melissa S. Mattmuller, Robert J. Hofinger, Ashoka K. S. Bhat, Badrul H. Chowdhury, Jerry C. Whitaker, and Isidor Buchmann, "The Electronics Handbook", Second Edition. Apr 2005 , 1033 -1257 2005.
3. Lubna Mariam, Malabika Basu, and Michael F. Conlon, "A Review of Existing Microgrid Architectures," *Journal of Engineering*, pp.1-8, 2013. doi:10.1155/2013/937614.
4. Changhee Cho; Jin-Hong Jeon; Jong-Yul Kim; Soonman Kwon; Kyongyop Park; Sungshin Kim, "Active Synchronizing Control of a Microgrid," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol.26, no.12, pp.3707,3719, Dec. 2011
5. N.W.A. Lidula, A.D. Rajapakse, "Microgrids research: A review of experimental microgrids and test systems", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 15, no. 1, pp. 186-202, January 2011.
6. Taha Selim Ustun, Cagil Ozansoy, Aladin Zayegh, "Recent developments in microgrids and example cases around the world—A review", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 15, no. 8, Pages 4030-4041, October 2011.
7. Ritwik Majumder, "Some Aspects of Stability in Microgrids", *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 28, no. 3, pp.3243,3252, Aug. 2013
8. C. Ma, Y. Hous, "Classified Overview of Microgrids and Developments in China" *Energy Tech* 2012, Ohio, pp. 1-6, 29-31 May 2012.
9. Kyrylenko O.V. Main features of the stability and reliability enhancement of electricity grid with DG in Ukraine based on IEEE standards / Kyrylenko, O.V., Strzelecki, R., Denysiuk, S.P., Derevianko, D.G. // *Technical Electrodynamics*. – 2013. – № 6. – С. 46–50.
10. Resnick Institute Report "Grid 2020 Towards a Policy of Renewable and Distributed Energy Resources", September 2012.
11. Denysiuk S.P. Otsinka efektyvnosti sumisnoi roboty rozoseredzhenykh dzherel heneratsii elektroenerhii, vkluchaiuchy vidnovliuvalni, v elektroenerhetychnykh systemakh [Tekst] / S.P. Denysiuk, T.M. Baziuk, D.H. Derevianko // *Visnyk Kremenchutskoho natsionalnoho universytetu imeni Mykhaila Ostrohradskoho*. – 2013. – № 3(80). – С. 54–59.
12. E. June, "Power Quality Standards for Electric," pp. 1–15, 2009.
13. Guerrero, J.M., "Connecting renewable energy sources into the smartgrid," 2011 IEEE International

Symposium on Industrial Electronics (ISIE), pp.2400-2566, 27-30 June 2011 ISIE 2011, Poland.

14. Suryanarayanan, S.; Mitra, J.; Biswas, S., "A conceptual framework of a hierarchically networked agent-based microgrid architecture," *2010 IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exposition*, , pp.1,5, 19-22 April 2010.

15. Sudipta Chakraborty, Bill Kramer, Benjamin Kroposki, "A review of power electronics interfaces for distributed energy systems towards achieving low-cost modular design", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol 13, no. 9, Pages 2323-2335, December 2009.

16. Ming Ding; Yingyuan Zhang; Meiqin Mao, "Key technologies for microgrids-a review," *International Conference on Sustainable Power Generation and Supply*, 2009. SUPERGEN '09., pp.1,5, 6-7 April 2009 , Nanjing China.

17. M. Nakhamkin, "Novel Compressed Air Energy Storage Concepts," in *Electricity Storage Association Meeting 2006: Energy Storage in Action* Knoxville, Tenn.: Energy Storage Association, 2006

18. W. Lachs, D. Sutanto, Uncertainty in electricity supply controlled by energy storage, *Proceedings of International Conference on Energy Management and Power Delivery*, EPDM'95, 1, November 21–23, 1995, pp. 302–307.

19. S.A. Lone, Mufti. M.D., Integrating redox flow battery system with a wind- diesel power system, in: *Proceedings of the International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems*, PEDES'06, December 12–15, 2006, pp. 1–6.

20. J. Zeng, B. Zhang, C. Mao, Y. Wang, Use of battery energy storage system to improve the power quality and stability of wind farms, in: *International Conference on Power System Technology*, PowerCon 2006, October 1–6, 2006.

21. D. Sutanto, Energy storage system to improve power quality and system reliability, in: *Student Conference on Research and Development*, SCORED 2002, 2002, pp. 8–11.

22. M.-T. Tsai, C.-E. Lin, W.-I. Tsai, C.-L. Huang, Design and implementation of a demand-side multifunction battery energy storage system, *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 42 (6) (1995) 642–652.

23. Cheung KYC, Cheung STH, Silva N, et al. Large-scale energy storage systems, *Imperial College London*, ISE22002/2003, Available online: [http://www.homes.doc.ic.ac.uk/~matti/ise2grp/energys-torage\\_report/\[2007-03-20\]](http://www.homes.doc.ic.ac.uk/~matti/ise2grp/energys-torage_report/[2007-03-20]).

24. ChaoyongHou; Xuehao Hu; Dong Hui, "Plug and play power electronics interface applied in microgrid," *2011 4th International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies (DRPT)*, pp.719,723, 6-9 July 2011.

25. Wei Huang, Miao Lu, Li Zhang, "Survey on Microgrid Control Strategies", *Energy Procedia*, vol. 12, Pages 206-212, 2011.

26. F Katiraci, R. Iravani, N. Hatziargyriou, A. Dimeas, "Microgrids management", *IEEE Power and Energy Magazine*, vol: 6, no: 3, pp. 54-65, May-June 2008.

27. Xisheng Tang; Zhiping Qi, "Energy storage control in renewable energy based microgrid," *2012 IEEE Power and Energy Society General Meeting*, pp.1-6, 22-26 July 2012.

28. Denysiuk S. A novel method of complex reliability assessment in Microgrids with Distributed Generation / Denysiuk S., Derevianko D. // *Proceedings of the International Conference on Modern Electrical and Energy Systems*, MEES 2017– p. 212-215.

**УДК 621.314**

**С. П. Денисюк**, д-р техн. наук, проф., **ORCID 0000-0002-6299-3680**  
**Д.Г. Деревянко**, канд. техн. наук, доц., **ORCID 0000-0002-4877-5601**  
**Национальный технический университет Украины**  
**«Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»**  
**Д. С. Горенко**, преподаватель, **ORCID 0000-0002-7879-7801**  
**Васильковский профессиональный колледж**  
**Национального авиационного университета**

## **ОСОБЕННОСТИ ОЦЕНКИ РЕЖИМОВ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ЛОКАЛЬНЫХ СИСТЕМ С ИСТОЧНИКАМИ РАСПЕРЕДЕЛЕННОЙ ГЕНЕРАЦИИ И НАКОПИТЕЛЯМИ**

Рассмотрена структура локальных электроэнергетических систем с источниками рассредоточенной генерации. Представлены основные модели указанных систем. Представлена детальная классификация звена генерации локальных электроэнергетических систем с источниками рассредоточенной генерации которая содержит основные характеристики генераторов. Проанализированы разнотипные средства накопления электроэнергии и особенности их применения. Выделены основные типы накопителей, которые

содержат устройства накопления электрической энергии с использованием конденсаторов и суперконденсаторов, устройства механического накопления энергии, устройства накопления химической энергии, устройства хранения тепловой энергии. Тщательно проанализированы энергетические процессы в электроэнергетических системах с источниками рассредоточенной генерации и накопителями электрической энергии путем оценки величин и знаков обменных мощностей в сечениях этих систем. Среди вышеуказанных процессов: несинусоидальных режима в сечениях локальных электроэнергетических системах и отклонения частоты при синусоидальных и несинусоидальных режимах работы. Для оптимизации энергетических процессов в указанных системах предложен метод визуального отображения технических и экономических показателей, который позволяет комплексно оценить системы с источниками рассредоточенной генерации и разнотипными накопителями электрической энергии и процессы в них. Учитывая особенности структуры и процессов функционирования систем с источниками рассредоточенной генерации выбраны следующие критерии, как экономическая составляющая стоимости элементов системы, ее доступность в указанном регионе, экологичность и срок службы. Для сочетание технических и экономических критериев предложено использовать их графическое отображение.

**Ключевые слова:** рассредоточена генерация, локальные электроэнергетические системы, Microgrid, накопители электроэнергии, энергетические процессы.

**S. Denysiuk**, Dr. Sc. Sciences., Prof., ORCID 0000-0002-6299-3680

**D. Derevyanko**, PhD, Assoc. Prof., ORCID 0000-0002-4877-5601

**National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"**

**D. Horenko**, Teacher, ORCID 0000-0002-7879-7801

**Vasylykiv Vocational College**

**National Aviation University**

## **MODES EVALUATION FEATURES IN LOCAL POWER SYSTEMS WITH DISTRIBUTED GENERATION AND STORAGE**

The structure of local electric power systems with sources of Dispersed Generation is considered. The main models of these systems are presented. A detailed classification of the generation unit of local power systems with sources of scattered generation is presented, which contains the main characteristics of generators. Different types of means of electricity storage and features of their application are analyzed. The main types of storage devices that contain devices for storing electricity using capacitors and supercapacitors, devices for mechanical energy storage, devices for storing chemical energy, storage devices for thermal energy are identified. Energy processes in electric power systems with distributed generation sources and electric energy storage devices are carefully analyzed by estimating the values and signs of exchange capacities in the intersections of these systems. Among the above processes: non-sinusoidal modes in the intersections of local power systems and frequency deviations in sinusoidal and non-sinusoidal modes of operation. To optimize energy processes in these systems, a method of visual display of technical and economic indicators is proposed, which allows a comprehensive assessment of systems with distributed generation sources and different types of electrical energy storage and processes in them. Taking into account the peculiarities of the structure and functioning of systems with sources of dispersed generation, such criteria as the economic component of the cost of system elements, its availability in the specified region, environmental friendliness and service life are selected. To combine technical and economic criteria, it is proposed to use their graphical representation.

**Keywords:** dispersed generation, local power systems, Microgrid, power storage, energy processes.

Надійшла 15.05.2020

Received 15.05.2020