

Л. В. ДАВИДЕНКО (д-р техн. наук, проф.), **В. А. ДАВИДЕНКО** (канд. техн. наук, доц.)
Луцький національний технічний університет
l.davydenko@lutsk-ntu.com.ua

АСПЕКТИ ІНТЕГРАЦІЇ В ЕЛЕКТРИЧНУ МЕРЕЖУ РОЗОСЕРЕДЖЕНОЇ ГЕНЕРАЦІЇ НА ОСНОВІ ВІДНОВЛЮВАЛЬНИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ: ОГЛЯД ПРОБЛЕМ ТА ЗАВДАННЯ ДЛЯ СТАЛОГО РОЗВИТКУ ЕНЕРГОСИСТЕМИ

Стаття присвячена огляду проблем, пов'язаних із інтеграцією розосередженої генерації на основі відновлювальних джерел енергії в електроенергетичну систему та їх впливом на роботу електричної мережі, а також завдань для забезпечення сталого функціонування інтегрованої електроенергетичної системи. Як інструмент вирішення виявлених проблем розглядається концепція технології Smart Grid та Micro Grid. Розглянуто структуру гібридної системи відновлювальної енергії, інтегрованої в мережу. Запропоновано структуру інформаційної технології комплексного моніторингу та енергетичного менеджменту гібридної системи відновлювальної енергії, яка побудована за принципом модульності та відкритості та представляє собою сукупність низки складних підсистем єдиної системи зберігання, пошуку, відображення та аналізу даних. Одним з результатів роботи інформаційної технології є побудова моделі профілю навантаження в Micro Grid, яка враховує модель навантаження та моделі генерації від кожного типу відновлювального джерела енергії гібридної системи.

Ключові слова: відновлювальні джерела енергії, гібридна система відновлювальної енергії, Smart Grid, Micro Grid.

Постановка проблеми. Забезпечення кліматичної нейтральності є одним з пріоритетних напрямків сталого розвитку суспільства. Згідно [1] понад 75% всіх викидів парникових газів припадає на виробництво та використання енергії. Досягнення встановлених в [2] цілей щодо скорочення викидів парникових газів на 55% до 2030 року вимагає переходу до низьковуглецевої енергетики, який супроводжується відмовою від домінування джерел електроенергії на основі вуглеводневого палива та пріоритетністю використання відновлювальних джерел енергії (ВДЕ). Енергетична стратегія України на період до 2035 року [3] містить низку завдань для виконання зобов'язань України відповідно до Договору про заснування Енергетичного Співтовариства, які спрямовані на реформування енергетичного сектору, оптимізацію та інноваційний розвиток енергетичної інфраструктури, забезпечення сталого розвитку, серед яких є подальший розвиток ВДЕ та зростання їх частки до 25% від загального первинного постачання енергії до 2035 року; розвиток розподіленої генерації та впровадження «розумних» енергетичних мереж тощо. Інтеграція ВДЕ в роботу електроенергетичних систем стає ключовим елементом ефективного енергетичного переходу та зниження вуглецевого сліду в електроенергетиці, але потребує розуміння низки проблем та шляхів їх вирішення для забезпечення стабільного функціонування інтегрованої енергосистеми.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Процес декарбонізації економіки передбачає електрифікацію секторів кінцевого споживання та, як наслідок, зростання попиту на електроенергію. ВДЕ є «чистими» джерелами забезпечення зростаючих потреб в електроенергії. Згідно результатів досліджень [4, 5, 6] протягом останніх років спостерігається інтенсивне зростання частки потужності нових джерел для виробництва електроенергії на основі відновлювальних ресурсів у порівнянні з джерелами на викопному паливі та атомній енергії. Використання ВДЕ сприяє зниженню потреб енергетичної системи в обсягах балансуєвих та регулюючих потужностей. У рамках енергетичного переходу змінюється архітектура енергетичної системи, яка стає децентралізованою та більш гнучкою. При цьому розподілена генерація (РГ) на основі використання ВДЕ розглядається як альтернативний варіант традиційній архітектурі енергосистеми з централізованою генерацією [7, 8] та основний напрямок розвитку сучасної енергетики для задоволення зростаючого попиту на електроенергію [9, 10, 11], підвищення ефективності та надійності роботи енергомережі [12] і якості електроенергії, що постачається. РГ охоплює широке коло технологій для виробництва електроенергії, таких як дизельні генератори, газові турбіни, мікротурбіни, паливні елементи, фотоелектричні та вітроенергетичні системи [9, 13, 14]. Найбільша частка впроваджених ВДЕ припадає саме на сонячну фотовольтаїчну та вітрову енергію [4, 5, 6], причому очікується подальше зростання їх частки. Інтенсивне будівництво сонячних та вітрових електростанцій зумовлює низку технічних проблем як з точки зору управління, так і з точки зору експлуатації електроенергетичної системи [7, 9, 11, 15], що потребує пошуку і постійного удосконалення шляхів їх вирішення.

Метою статті є огляд проблем, пов'язаних із інтеграцією ВДЕ в електроенергетичну систему та їх впливом на роботу електричної мережі, а також завдань та шляхів їх вирішення для забезпечення сталого функціонування інтегрованої електроенергетичної системи.

Основний матеріал дослідження. Інтеграція ВДЕ в електроенергетичну систему зумовлює зміну властивостей самої системи і вимагає реалізації управління режимом роботи енергосистеми в різних умовах.

Робота вітрових та сонячних електростанцій залежить від наявності сонця та вітру, тому генерація електроенергії може різко змінюватися впродовж доби через зміну погодних умов [7, 14, 16]. Невизначеність генерації ВДЕ може привести до неоптимального складу генеруючих одиниць на розрахунковий період для балансування енергосистеми. Тобто, непостійність, періодичність і непередбачуваність енергетичного потенціалу ВДЕ є однією з проблем для їх ефективної інтеграції в енергосистему [11, 15, 16, 17]. Переривчастий характер ВДЕ є причиною втрати генерації, що призводить до зниження надійності електропостачання, а також коливань частоти в мережі [13]. Крім того, джерела РГ під'єднують до електричної мережі за допомогою перетворювачів та інверторів. Висока частота перемикання вентиляльних елементів в перетворювачах може зумовлювати додаткові гармоніки напруги та струму вищих порядків, зростання дози флікера [18], тобто зниження якості електроенергії в енергосистемі [8]. Слід зазначити, що велика частка електроенергії виробленої ВДЕ припадає на фотоелектричні (PV) системи. PV системи набувають все більшого застосування як у вигляді великих потужних промислових сонячних електростанцій, так і невеликих дахових систем малої потужності, що працюють як в автономному режимі, так і разом з мережею. Інтеграція маломасштабних ВДЕ спричиняє такі проблеми як зміни коефіцієнта потужності, коливання напруги, гармонійні спотворення та вимагає синхронізації джерел з мережею [14]. Ефективне регулювання якості електроенергії є важливим завданням як на рівні генерації (у точці з'єднання кількох джерел енергії), так і на рівні споживача (у точці приєднання навантаження в розподільчій мережі) [14].

Іншою проблемою є невідповідність між піковим електроспоживанням і максимальною доступністю генерації від ВДЕ. Застосування гібридних систем відновлювальної енергії, які передбачають поєднання кількох технологій генерації (фотовольтаїчної, вітрової енергії, енергії припливів і відпливів [17, 19, 20]), а також використання систем накопичення енергії [13, 16, 20, 21] розглядається як спосіб зниження мінливості ВДЕ та підвищення стабільності генерування електроенергії, надійності електропостачання [9, 14, 21]. Поєднання фотоелектричних панелей і вітроелектричних установок підвищує загальну вихідну енергію та згладжує режим генерування, а застосування систем накопичення енергії зменшує відносну величину випадкових флуктуацій. Наявність запасу енергії у накопичувачі забезпечує покриття навантаження у випадку недостатнього обсягу генерування ВДЕ. При цьому, керування процесом заряду/розряду виконується за фактом наявності/відсутності позитивної різниці між енергією, генерованою ВДЕ та спожитою навантаженням. Разом з тим інтеграція в мережу різних типів ВДЕ та систем накопичення енергії потребує узгодження їх режимів роботи та синхронізації з мережею та ускладнює процес керування енергосистемою [14, 21]. Підключення до електричної мережі неконтрольованих джерел енергії ускладнює балансування в енергосистемі [15]. Таким чином, сумісна робота різних за природою і енергетичним потенціалом ВДЕ та їх інтеграція в мережу вимагає розробки нових методів аналізу і оптимізації режимів їх роботи, більш складних систем управління і законів керування для координації, синхронізації ВДЕ з мережею, узгодження взаємодії всіх елементів енергосистеми, контролю та регулювання потоками енергії, розподілу електроенергії і навантаження [9] для забезпечення стабільної роботи енергосистеми.

Слід зазначити, що високе проникнення ВДЕ в енергосистему та їх переривчастість створює проблему з реалізацією методології планування генерації електроенергії та роботи енергосистеми [10]. Нестабільний характер генерації ВДЕ зумовлює невизначеність в енергопостачанні, може призвести до дисбалансу попиту-пропозиції. Це вимагає скоординованого планування функціонування електроенергетичної системи та урахування зв'язків між різними енергоносіями та секторами споживання. Для стабільного функціонування електроенергетичної системи необхідним є планування генерації та попиту електроенергії і одним з важливих етапів в цьому процесі є прогнозування обсягів генерації від ВДЕ. Прогноз генерації дає інформацію щодо обсягів виробництва енергії певною електростанцією, що сприяє оптимізації маркетингу відновлюваної енергії і розгортанню системної інтеграції. Прогнози генерації електроенергії від ВДЕ є необхідними як для учасників енергоринку, які займаються купівлею або продажем енергії, так і для операторів енергосистеми, які забезпечують підтримку стабільності енергосистеми. Прогнозування обсягів генерації ВДЕ у різних часових масштабах є основою досягнення балансу електромережі, забезпечення безпечної експлуатації, ефективного управління та стабільності енергосистеми. Надійний прогноз є ключовим моментом для забезпечення оптимальної диспетчеризації, реагування на попит, регулювання мережі та інтелектуального управління енергією [22]. Прогнозування генерації ВДЕ є важливим моментом процесу планування стійкого електропостачання та покриття електричного навантаження енергосистем відповідно до попиту. Прогнозне значення обсягів генерації електроенергії на рівні ВДЕ є необхідним для узгодження з оператором електричної мережі плану генерації. Прогноз генерації ВДЕ на добу наперед є важливим моментом для розміщення пропозицій власника ВДЕ на ринку електроенергії «на добу наперед», а також для оптимізації ставок на електроенергію на ринку електроенергії «на добу наперед» та внутрішньодобовому ринку. Разом з тим, через

переривчастий характер та метеозалежність ВДЕ, зокрема, вітрових та фотовольтаїчних електростанцій, точна оцінка та прогноз генерування електроенергії є складним завданням [10, 22]. Це ускладнює планування, диспетчеризацію та контроль генерації електроенергії та режимів роботи енергосистеми [10, 21].

Управління роботою джерел РГ енергії вимагає обробки великої кількості інформації, які потребують інтелектуальних методів аналізу даних для забезпечення можливості здійснення управління [9]. Ефективна інтеграція ВДЕ в мережу та підтримка злагодженості роботи окремих елементів енергосистеми потребує відповідної перебудови мережевої інфраструктури та впровадження інтелектуальних систем управління генерацією, передачею, розподілом та споживанням електроенергії, при чому в режимі реального часу. Це вимагає побудови розвиненого комунікаційного середовища, здатного надійно і якісно підтримувати інформаційний обмін між постачальниками і споживачами електроенергії. Вирішення цих питань забезпечує концепція Smart Grid [21], в якій інфраструктура системи генерації, передачі та розподілу електроенергії доповнена розвинутою інфраструктурою системи вимірювання та передачі даних за допомогою сучасних технологій зв'язку на основі бездротових інтелектуальних комунікаційних пристроїв (розумних лічильників), а також системою моніторингу і управління режимом роботи всіх елементів електроенергетичної системи та попитом на основі двонаправленого потоку електроенергії та інформації [12, 23]. При цьому, інтелектуальні пристрої для моніторингу та контролю є складовими компонентами генерації інформаційних процесів у реальному часі [21].

У реалізації положень концепції Smart Grid слід відзначити зростання ролі локальних енергосистем з ВДЕ з різним ступенем гібридизації [6]. Реалізація технології Smart Grid забезпечує адаптацію електричної мережі до інтеграції некерованих та умовно-керованих джерел РГ та формування нових інфраструктур таких як Micro Grid, а також об'єднання географічно розосереджених ВДЕ у віртуальні електростанції.

Micro Grid як підсистема мережі об'єднує генерацію з встановлених поблизу споживачів малих розподілених ВДЕ різних типів і пов'язані з нею навантаження та зв'язана з мережею за допомогою двонаправленого перетворювача [7]. Узагальнена структура Micro Grid представляє собою багатоконвертерну двоконтурну гібридну систему відновлювальної енергії [10, 16, 17, 19, 20, 24, 25] (рис. 1), яка складається з системи перетворення вітрової енергії (вітрових турбін - WT), фотоелектричних (PV) панелей та гібридної системи накопичення енергії (HESS) що складається з банку акумуляторів (BB) та банку суперконденсаторів (SC). HESS характеризує вигідне сполучення двох або більше технологій зберігання енергії з взаємодоповнюючими експлуатаційними характеристиками (такими як щільність енергії та потужності, швидкість саморозряду, ефективність, термін експлуатації тощо). Гібридна система відновлювальної енергії також містить когенераційну установку, що працює на біогазі, яка є резервним джерелом енергії, особливо взимку. Схема передбачає зв'язок із зовнішньою мережею. WT, PV та HESS через індивідуальні перетворювачі підключені до шини постійного струму (DC). Алгоритм точки максимальної потужності (MPPT) забезпечує максимальне перетворення потужності від вітру, а також PV-джерела енергії. Генератор змінного струму у складі когенераційної установки підключено до шини змінного струму (AC). Двонаправлений перетворювач DC/DC HESS забезпечує зарядку чи розрядку залежно від генерації електроенергії від ВДЕ та потреби споживачів. Мережевий двонаправлений інвертор DC/AC забезпечує зарядку акумуляторів від генератора змінного струму й перетворення постійного струму від сонячних батарей і акумуляторів у змінний струм. Структура гібридної системи відновлювальної енергії також забезпечує можливість електропостачання споживача тільки від одного джерела. Гібридна система відновлювальної енергії може працювати як автономно, так і з підтримкою від мережі. Також надлишок енергії може генеруватись в мережу для її продажу.

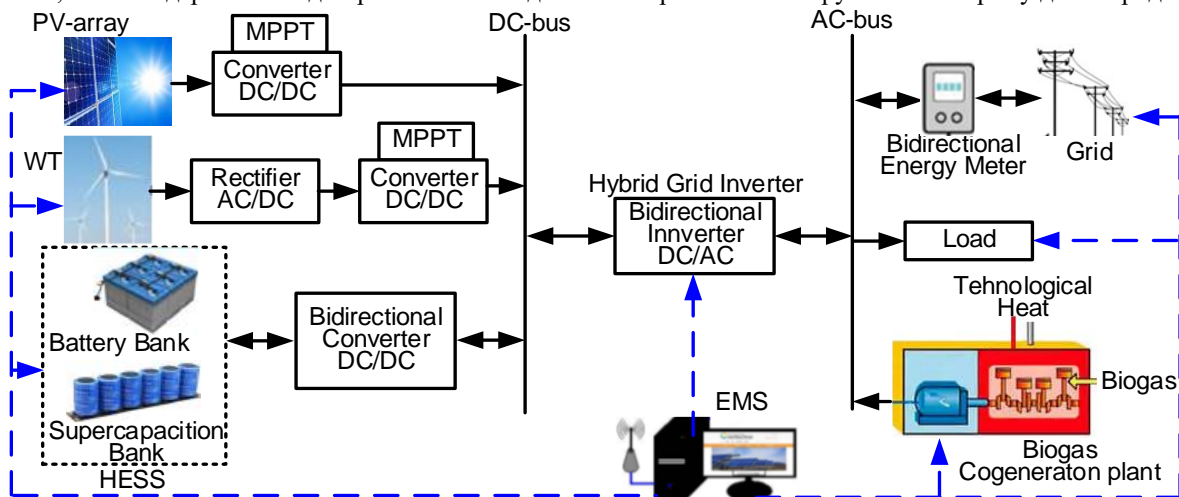


Рисунок 1 – Структурна схема гібридної системи відновлювальної енергії

Технологія Micro Grid дозволяє ВДЕ «краще вливатися» в енергосистему [7] і сприяє підвищенню рівня

надійності та стійкості розумної енергосистеми [23]. Разом з тим, інтеграція переривчастих джерел енергії і навантажень в Micro Grid потребує впровадження системи енергетичного менеджменту (EMS), яка має на меті забезпечити реалізацію стратегій управління як на стороні генерації, так і на стороні попиту. Урахування профілю навантаження, оптимальне планування РГ, оптимальний розмір ВДЕ та оптимальний розмір HESS забезпечують баланс попиту та пропозиції в Micro Grid. Разом з тим, невизначеність навантажень та генерації в Micro Grid вимагають ефективного моніторингу (планування та контролю) як електроспоживання, так і генерації електроенергії від кожного ВДЕ для управління роботою елементів мережі та реалізації стратегій управління попитом. Таким чином, диспетчеризація навантаження та комплексна система управління є важливим елементом Micro Grid для координації та оптимізації процесу виробництва та зберігання енергії, а також споживання енергії з мережі та генерації надлишку електроенергії в мережу. При цьому реалізація ефективного управління вимагає розробки відповідних інтелектуальних алгоритмів моделювання, планування та управління.

Слід зазначити, значне проникнення ВДЕ вимагає зміни парадигми моделі навантаження в електричній мережі. Підходи до планування навантаження в інтегрованій мережі повинні враховувати модель генерації електроенергії від ВДЕ з урахуванням погодних умов, модель електроспоживання з урахуванням впливу сезонних та соціальних чинників, а також стратегію управління попитом, що забезпечить формування узагальненої моделі навантаження в мережі та побудови профілю навантаження. При цьому, зважаючи на багатопараметричність задачі та невизначеність в даних, для реалізації процесу моделювання доцільним є застосування підходів, що забезпечують побудову моделей, здатних до самоорганізації. Реалізація процесу моделювання на основі ретроспективних експериментальних даних вимагає моніторингу низки чинників, що визначають генерацію та споживання електроенергії, та розробки відповідної інформаційної системи комплексного моніторингу та управління для забезпечення ефективного режиму роботи енергосистеми.

Укрупнена структура інформаційної технології комплексного моніторингу та енергетичного менеджменту гібридної системи відновлювальної енергії, побудованої за принципом модульності, відкритості, надійності і безпеки, представляє собою сукупність низки складних підсистем єдиної системи зберігання, пошуку, відображення та аналізу даних:

- модуль збору, попередньої обробки та зберігання даних, містить: блок даних про погодні умови, що мають вплив на величину генерації електроенергії від ВДЕ; блок технічних характеристик ВДЕ (за типами ВДЕ); блок даних про електроспоживання в мережі; блок даних про кліматичні та сезонні чинники, що мають вплив на електроспоживання в мережі;

- модуль інтелектуального аналізу даних, містить: блок моделювання генерації (за типами ВДЕ та загальної); блок моделювання електроспоживання (з урахуванням циклічних змін, зумовлених впливом кліматичних, сезонних та соціальних чинників); блок моделювання профілю навантаження в мережі після генерації;

- модуль планування, містить: блок планування генерації; блок планування електроспоживання; блок планування профілю навантаження;

- модуль контролю та інтелектуального управління, містить: блок МРРТ; блок контролю та управління зарядом/розрядом HESS; блок управління навантаженням з урахуванням стратегій управління попитом; блок управління генерацією електроенергії в мережу (споживання з мережі) з урахуванням тарифів на електроенергію.

Кожен блок інформаційної системи містить набір методів та алгоритмів для вирішення відповідних завдань. Множина існуючих в Micro Grid структурних, функціональних та інформаційних відносин виступає елементом алгоритму інформаційного пошуку, тобто, вказує послідовність вибірки інформації, набір та порядок необхідних розрахунків і контрольних процедур та керуючих впливів.

Слід зазначити, що розвиток технології розумних мереж передбачає не лише удосконалення технічної інфраструктури, а й реорганізацію ринку послуг електроенергетики. В розумній енергосистемі кінцевий споживач електроенергії розглядається як рівноправний партнер суб'єктів електроенергетики в частині забезпечення надійної роботи енергосистеми, який зацікавлений приймати участь у постачанні електроенергії та управлінні попитом [13]. Такий споживач набуває статусу «активний» (просьюмера) і отримує різного роду вигоди. Просьюмери можуть як виробляти, так і споживати електроенергію з відновлюваних джерел та ділитися нею в енергетичному співтоваристві або постачати надлишки енергії назад у мережу. Smart Grid забезпечує двосторонній зв'язок між комунальним підприємством і споживачами, реалізує відстеження та контроль попиту з урахуванням виробництва та споживання електроенергії, заохочує участь користувачів у співпраці через механізм реагування на попит.

Концепція Micro Grid сприяє об'єднанню активних споживачів (наприклад, домогосподарств, що мають власні генеруючі потужності) і передбачає оптимальне співвідношення між генерацією і споживанням на рівні мікрорайону або селища, припускаючи, що система розподілу дозволяє продавати електроенергію або купувати її в міру необхідності. Режим роботи джерел РГ у кожен окремий період часу визначається режимними вимогами й інтересами ринку. При цьому, повністю забезпечуються власні потреби активного споживача та максимально ефективно використовується можливість отримання прибутку за рахунок продажу надлишків

виробленої енергії в систему енергопостачання або іншим споживачам. Крім того, Microgrid виступає як система взаємодії активних споживачів та віртуальних електростанцій. Географічно розосереджені ВДЕ, об'єднані в віртуальні електростанції, мають оперативний зв'язок та єдине автоматизоване керування, що забезпечує узгоджений контроль над технологіями, використовуючи переваги їх синергії [6, 26].

Формування таких інфраструктур, як Micro Grid та віртуальні електростанції, сприяє зменшенню мінливості сумарних графіків генерації електроенергії ВДЕ, забезпеченню резерву потужності для регулювання частоти при виникненні небалансів та збалансуванню регіональних коливань [15]. Впровадження концепції Smart Grid дозволяє говорити про створення розумних енергетичних систем, орієнтованих на вирішення проблем оптимізації, балансу та загальної ефективності взаємопов'язаних енергетичних технологій і процесів, які реалізуються в рамках енергосистеми. Енергетична система, побудована на основі концепції Smart Grid, дозволяє інтегрувати дії всіх підключених до неї користувачів (генераторів, споживачів та інших об'єктів) та забезпечити гнучкість керування РГ [14], підвищити надійність та економічну ефективність енергопостачання, як для постачальників, так і для споживачів. Реалізація стратегій узгодженого керування споживанням та РГ з використанням технологій гібридизації дає змогу забезпечити ефективне використання джерел РГ та стабільність енергопостачання, підвищити гнучкість та продуктивність мережі, енергоефективність, надійність та стійкість енергосистеми [13, 23].

Висновки. Впровадження РГ з використанням ВДЕ є напрямком реалізації стратегії декарбонізації енергетики, який сприяє зниженню вуглецевого сліду, проте створює низку проблем для енергосистеми, як під час підключення ВДЕ до мережі, так і під час керування режимами роботи енергосистеми. Впровадження джерел РГ вимагає змін у стратегіях моніторингу, управління (як на стороні пропозиції, так і на стороні попиту), балансування системи та організації двосторонніх комунікацій між елементами енергосистеми і споживачами. Забезпечення планування генерації відновлювальної енергії та її контролю в рамках системи моніторингу режимів роботи ВДЕ є основою підвищення ефективності та надійності функціонування енергетичної системи. Створення системи прогнозування генерації електроенергії від ВДЕ є важливим засобом оптимізації режимів роботи енергетичної інфраструктури, управління та забезпечення ефективного функціонування енергетичної системи. При цьому, поєднання інтелектуальних систем вимірювання, моніторингу та управління на основі двостороннього обміну інформацією між енергосистемою та споживачем з використанням сучасних інформаційно-комунікаційних технологій є основою забезпечення узгодження режимів роботи ВДЕ та енергосистеми, розв'язання задач балансу споживання та генерації електроенергії на макро- і мікрорівнях. Тобто, інтеграція РГ з використанням технологій гібридизації та реалізація концепції Smart Grid є пріоритетним напрямком підвищення стабільності, енергетичної та економічної ефективності, надійності та безпеки енергосистеми.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Communication from the Commission to the European Parliament, the European Council, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions. The European Green Deal. EC. Brussels, 11.12.2019 COM(2019) 640 final. Available: <https://eur-lex.europa.eu/>
2. Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions. 'Fit for 55': delivering the EU's 2030 Climate Target on the way to climate neutrality. EC. Brussels, 14.7.2021 COM(2021) 550. Available: <https://eur-lex.europa.eu/>
3. Енергетична стратегія України на період до 2035 року "Безпека, енергоефективність, конкурентоспроможність". Розпорядження КМУ від 18 серпня 2017 р. № 605-р. Available: <https://zakon.rada.gov.ua/>
4. World Energy Transitions Outlook: 1.5°C Pathway. International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi. 312 p. 2021. Available: <https://www.irena.org/publications/2021/Jun/World-Energy-Transitions-Outlook>
5. Renewables 2022. Global Status Report. REN21. Paris, France. 309 p. 2023. Available: https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/GSR2022_Full_Report.pdf
6. How hybrid PV technologies can contribute to the decarbonisation of Thailand's power system. IEA, Paris. 2022. Available: <https://www.iea.org/reports/>
7. X. Zhang, W. Pei, W. Deng, Y. Du, Z. Qi, and Z. Dong, Emerging smart grid technology for mitigating global warming, *International journal of energy research*, 39, 1742–1756, 2015. <https://doi.org/10.1002/er.3296>.
8. K.M.R. Pothireddy, S.Vuddanti, and S.R. Salkuti, Impact of Demand Response on Optimal Sizing of Distributed Generation and Customer Tariff, *Energies*, 15, 190, 2022. <https://doi.org/10.3390/en15010190>
9. I. Alotaibi, M.A. Abido, M. Khalid, and A.V. Savkin, A Comprehensive Review of Recent Advances in Smart Grids: A Sustainable Future with Renewable Energy Resources, *Energies*, 13, 6269, 2020. <https://doi.org/10.3390/en13236269>.
10. A. Panda, U. Mishra, M.-L. Tseng, and M.H. Ali, Hybrid power systems with emission minimization: Multi-objective optimal operation, *Journal of Cleaner Production*, Vol. 268, 121418, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121418>
11. S.M. Dubey, H.M. Dubey, M. Pandit, and S.R. Salkuti, Multiobjective Scheduling of Hybrid Renewable

- Energy System Using Equilibrium Optimization, *Energies*, 14, 6376, 2021. <https://doi.org/10.3390/en14196376>
12. H.A. Muqet, R. Liaqat, M. Jamil, and A.A. Khan, A State-of-the-Art Review of Smart Energy Systems and Their Management in a Smart Grid Environment, *Energies*, 16, 472, 2023. <https://doi.org/10.3390/en16010472>
13. D.O. Johnson, J.O. Petrin, and S.F. Oyelekan, Integration of Distributed Energy Resources in Smart Grid System, *International Conference of Science, Engineering & Environmental Technology (ICONSEET)*, 2(6): 38-47, 2017
14. K.S. Reddy, M. Kumar, T.K. Mallick, H. Sharon, and S. Lokeswaran, A review of Integration, Control, Communication and Metering (ICCM) of renewable energy based smart grid, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 38, pp. 180–192, 2014. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2014.05.049>
15. S. Cole, K. Karoui, T.K. Vrana, Ol. B. Fosso, J.-B. Curis, A.-M. Denis, and C.-C. Liu, A european supergrid: present state and future challenges, *17th Power Systems Computation Conference Stockholm Sweden - August 22-26*, pp. 51-58, 2011. <http://toc.proceedings.com/13225webtoc.pdf>
16. S. S. Reddy, Optimal scheduling of thermal-wind-solar power system with storage, *Renewable Energy*, Vol. 101, pp. 1357-1368, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.10.022>
17. R.R. Soni, R.S. Meena, S. Johari, M. Lodha, and J.S. Rathore, Modeling and Steady State Response Analysis of Interconnected Hybrid Renewable Energy Network with Embedded VSC - MTDC Transmission System for Secure and Efficient Power Delivery. *International Journal of Research and Innovation in Social Science (IJRISS)*, Vol. I, Is.VII, pp.1-13, 2017.
18. E.J. Coster, J.M.A. Myrzik, W.L. Kling, and B. Kruimer. Integration Issues of Distributed Generation in Distribution Grids, *Proceedings of the IEEE*, Vol. 99, No. 1, pp. 28-39, 2011. <https://doi.org/10.1109/JPROC.2010.2052776>
19. R.S. Meena, Sustainable Development of Remote Isolated Communities Using Integrated Hybrid System: A New Generation of Renewable Energy, *Akshaya Urja, Magazine of Ministry of New & Renewable Energy*, Vol. 10, Is. 2, pp. 42-45, 2016.
20. R.S. Meena, D. Sharma, and Dr. D.K. Birla, PV-Wind Hybrid System with Fuel Cell & Electrolyzer, *International Journal of Engineering Research*, Vol.4, Is.12, pp: 673-679, 2015.
21. G. Dileep, A survey on smart grid technologies and applications, *Renewable Energy*, 146, pp. 2589-2625, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.08.092>
22. S. Massucco, G. Mosaico, M. Saviozzi, and F. Silvestro, A Hybrid Technique for Day-Ahead PV Generation Forecasting Using Clear-Sky Models or Ensemble of Artificial Neural Networks According to a Decision Tree Approach, *Energies*, 12(7),1298, 2019. <https://doi.org/10.3390/en12071298>
23. A. Swain, S.R. Salkuti, and K. Swain, An Optimized and Decentralized Energy Provision System for Smart Cities, *Energies*, 14, 1451, 2021. <https://doi.org/10.3390/en14051451>
24. A. Yahiaoui, and A. Tlemçani, Superior performances strategies of different hybrid renewable energy systems configurations with energy storage units, *Wind Engineering*, 46(5). Pp. 1471-1486, 2022. <https://doi.org/10.1177/0309524X221084124>
25. P. Gajewski, and K. Pieńkowski, Control of the Hybrid Renewable Energy System with Wind Turbine, Photovoltaic Panels and Battery Energy Storage, *Energies*, 14, 1595, 2021. <https://doi.org/10.3390/en14061595>
26. Ö. Aydin, and Z. Demir, Smart grid integrated with hybrid renewable energy systems. *Eskişehir technical university journal of science and technology. A-Applied sciences and engineering*, Vol: 20, pp. 120 -131, 2019. <https://doi.org/10.18038/estubtda.649075>

REFERENCES

1. Communication from the Commission to the European Parliament, the European Council, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions. The European Green Deal. EC. Brussels, 11.12.2019 COM(2019) 640 final. Available: <https://eur-lex.europa.eu/>
2. Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions. 'Fit for 55': delivering the EU's 2030 Climate Target on the way to climate neutrality. EC. Brussels, 14.7.2021 COM(2021) 550. Available: <https://eur-lex.europa.eu/>
3. Energy strategy of Ukraine for the period until 2035 "Security, energy efficiency, competitiveness". Order of the CMU of August 18, 2017 No. 605-r. Available: <https://zakon.rada.gov.ua/>
4. World Energy Transitions Outlook: 1.5°C Pathway. International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi. 312 p. 2021. Available: <https://www.irena.org/publications/2021/Jun/World-Energy-Transitions-Outlook>
5. Renewables 2022. Global Status Report. REN21. Paris, France. 309 p. 2023. Available: https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/GSR2022_Full_Report.pdf
6. How hybrid PV technologies can contribute to the decarbonisation of Thailand's power system. IEA, Paris. 2022. Available: <https://www.iea.org/reports/>
7. X. Zhang, W. Pei, W. Deng, Y. Du, Z. Qi, and Z. Dong, Emerging smart grid technology for mitigating global warming, *International journal of energy research*, 39, 1742–1756, 2015. <https://doi.org/10.1002/er.3296>
8. K.M.R. Pothireddy, S.Vuddanti, and S.R. Salkuti, Impact of Demand Response on Optimal Sizing of

- Distributed Generation and Customer Tariff, *Energies*, 15, 190, 2022. <https://doi.org/10.3390/en15010190>
9. I. Alotaibi, M.A. Abido, M. Khalid, and A.V. Savkin, A Comprehensive Review of Recent Advances in Smart Grids: A Sustainable Future with Renewable Energy Resources, *Energies*, 13, 6269, 2020. <https://doi.org/10.3390/en13236269>.
 10. A. Panda, U. Mishra, M.-L. Tseng, and M.H. Ali, Hybrid power systems with emission minimization: Multi-objective optimal operation, *Journal of Cleaner Production*, Vol. 268, 121418, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121418>
 11. S.M. Dubey, H.M. Dubey, M. Pandit, and S.R. Salkuti, Multiobjective Scheduling of Hybrid Renewable Energy System Using Equilibrium Optimization, *Energies*, 14, 6376, 2021. <https://doi.org/10.3390/en14196376>
 12. H.A. Muqet, R. Liaqat, M. Jamil, and A.A. Khan, A State-of-the-Art Review of Smart Energy Systems and Their Management in a Smart Grid Environment, *Energies*, 16, 472, 2023. <https://doi.org/10.3390/en16010472>
 13. D.O. Johnson, J.O. Petinrin, and S.F. Oyelekan, Integration of Distributed Energy Resources in Smart Grid System, *International Conference of Science, Engineering & Environmental Technology (ICONSEET)*, 2(6): 38-47, 2017
 14. K.S. Reddy, M. Kumar, T.K. Mallick, H. Sharon, and S. Lokeswaran, A review of Integration, Control, Communication and Metering (ICCM) of renewable energy based smart grid, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 38, pp. 180–192, 2014. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2014.05.049>
 15. S. Cole, K. Karoui, T.K. Vrana, Ol. B. Fosso, J.-B. Curis, A.-M. Denis, and C.-C. Liu, A european supergrid: present state and future challenges, *17th Power Systems Computation Conference Stockholm Sweden - August 22-26*, pp. 51-58, 2011. <http://toc.proceedings.com/13225webtoc.pdf>
 16. S. S. Reddy, Optimal scheduling of thermal-wind-solar power system with storage, *Renewable Energy*, Vol. 101, pp. 1357-1368, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.10.022>
 17. R.R. Soni, R.S. Meena, S. Johari, M. Lodha, and J.S. Rathore, Modeling and Steady State Response Analysis of Interconnected Hybrid Renewable Energy Network with Embedded VSC - MTDC Transmission System for Secure and Efficient Power Delivery. *International Journal of Research and Innovation in Social Science (IJRISS)*, Vol. I, Is.VII, pp.1-13, 2017.
 18. E.J. Coster, J.M.A. Myrzik, W.L. Kling, and B. Kruimer. Integration Issues of Distributed Generation in Distribution Grids, *Proceedings of the IEEE*, Vol. 99, No. 1, pp. 28-39, 2011. <https://doi.org/10.1109/JPROC.2010.2052776>
 19. R.S. Meena, Sustainable Development of Remote Isolated Communities Using Integrated Hybrid System: A New Generation of Renewable Energy, *Akshaya Urja, Magazine of Ministry of New & Renewable Energy*, Vol. 10, Is. 2, pp. 42-45, 2016.
 20. R.S. Meena, D. Sharma, and Dr. D.K. Birla, PV-Wind Hybrid System with Fuel Cell & Electrolyzer, *International Journal of Engineering Research*, Vol.4, Is.12, pp: 673-679, 2015.
 21. G. Dileep, A survey on smart grid technologies and applications, *Renewable Energy*, 146, pp. 2589-2625, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.08.092>
 22. S. Massucco, G. Mosaico, M. Saviozzi, and F. Silvestro, A Hybrid Technique for Day-Ahead PV Generation Forecasting Using Clear-Sky Models or Ensemble of Artificial Neural Networks According to a Decision Tree Approach, *Energies*, 12(7),1298, 2019. <https://doi.org/10.3390/en12071298>
 23. A. Swain, S.R. Salkuti, and K. Swain, An Optimized and Decentralized Energy Provision System for Smart Cities, *Energies*, 14, 1451, 2021. <https://doi.org/10.3390/en14051451>
 24. A. Yahiaoui, and A. Tlemçani, Superior performances strategies of different hybrid renewable energy systems configurations with energy storage units, *Wind Engineering*, 46(5). Pp. 1471-1486, 2022. <https://doi.org/10.1177/0309524X221084124>
 25. P. Gajewski, and K. Pieńkowski, Control of the Hybrid Renewable Energy System with Wind Turbine, Photovoltaic Panels and Battery Energy Storage, *Energies*, 14, 1595, 2021. <https://doi.org/10.3390/en14061595>
 26. Ö. Aydin, and Z. Demir, Smart grid integrated with hybrid renewable energy systems. *Eskişehir technical university journal of science and technology. A-Applied sciences and engineering*, Vol: 20, pp. 120 -131, 2019. <https://doi.org/10.18038/estubtda.649075>

L.V. DAVYDENKO, V.A. DAVYDENKO
Lutsk National Technical University

Aspects of integration into the electric network of decentralized generation based on renewable energy sources: an overview of issues and tasks for the sustainable development of the energy system. The article is devoted to an overview of the issues associated with the integration of distributed generation based on renewable energy sources into the electric power system and their impact on the operation of the electric network. The main tasks for ensuring the sustainable functioning of the integrated electric power system are considered. The application of hybrid renewable energy systems and the concept of Smart Grid and Micro Grid technologies are considered as a tool for solving the identified problems. The structure of the hybrid renewable energy system for increasing the stability of power

generation in the Micro Grid is considered. The main tasks of the energy management system for an integrated Micro Grid with various renewable energy sources are described. The structure of the information technology of integrated monitoring and energy management of the hybrid renewable energy system is proposed. Information technology is a combination of a number of complex subsystems of a single system of data storage, search, display and analysis. Creating information technology based on the principle of modularity and openness allows changing its structure. One of the results of information technology work is the construction of a load profile model in the Micro Grid, which takes into account the power consumption model (taking into account the cyclical changes caused by the influence of climatic, seasonal and social factors) and the generation model from each type of renewable energy source of the hybrid system (taking into account the influence of weather factors). Predictive models are the basis for planning electricity generation from renewable energy sources and planning the load profile in the Micro Grid to implement demand side management strategies.

Keywords: *renewable energy sources, hybrid renewable energy system, Smart Grid, Micro Grid.*