

РЕЖИМИ РОБОТИ ГІБРИДНОЇ АВТОНОМНОЇ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНОЇ СИСТЕМИ З КОМБІНОВАНИМИ ДЖЕРЕЛАМИ ЕНЕРГІЇ

Отримано 23 лют. 2026 р.; рекомендовано до публікації 26 чер. 2026 р.
Доступно онлайн 30 чер. 2026 р.

Коваленко М. А.¹, Остапчук О. В.², Коваленко І. Я.³,
Труханов О. В.⁴, Вишневський О. В.⁵

Автор для кореспонденції: Коваленко Михайло,
e-mail: kovalenko87ma@gmail.com

¹ канд. техн. наук, доцент
<https://orcid.org/0000-0002-5602-2001>

² д-р. техн. наук, професор
<https://orcid.org/0000-0003-3397-2423>

³ PhD, асистент
<https://orcid.org/0000-0003-1097-2041>

⁴ аспірант
<https://orcid.org/0009-0004-4040-2204>

⁵ асистент
<https://orcid.org/0000-0001-7814-9030>

^{1, 2, 3, 4, 5} Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна

² Інститут відновлюваної енергетики НАН України, м. Київ, Україна

Анотація. У роботі проведено аналіз режимів функціонування автономної гібридної системи енергозабезпечення, що базується на комбінованому використанні енергії вітру з синхронним генератором на постійних магнітах, дизель-генераторної установки та системи накопичення з акумуляторними батареями. Обґрунтовано актуальність впровадження таких систем для приватних домогосподарств з високим піковим навантаженням (до 20 кВт) в умовах відсутності централізованого електропостачання. Розроблено чисельну імітаційну модель, яка дає змогу оцінити динаміку розподілу потужностей між джерелами залежно від швидкості вітру та стану заряду акумуляторних батарей. Побудовано залежності розподілу потужності за різної швидкості вітру та різного рівня заряду акумуляторів. Показано, що, застосовуючи гібридний інвертор з MPPT у поєднанні з накопичувачами LiFePO₄, можна мінімізувати час роботи паливного генератора, використовуючи його лише в разі досягнення критичного порогу розряду АКБ (менше 20 %). Встановлено, що робота ДГУ в режимі форсованого заряду акумуляторів на потужності 70–80 % від номінальної забезпечує значне зниження питомої витрати палива та подовження міжремонтного ресурсу двигуна. Впровадження вітрогенератора з інтелектуальним керуванням заряду дає змогу досягти економії паливно-мастильних матеріалів на рівні 45–65 % порівняно з традиційними схемами живлення. Запропонована модель може бути використана для проектування вискоелективних автономних систем енергозабезпечення.

Ключові слова: гібридна енергосистема, вітрогенератор, дизель-генератор, імітаційне моделювання, джерело безперебійного живлення, акумуляторна батарея.

Перелік використаних позначень та скорочень

ВДЕ – відновлювані джерела енергії
ДГУ – дизель-генераторна установка
ДБЖ – джерело безперебійного живлення

ВЕУ – вітроенергетичні установки
СЕС – сонячна електростанція
АКБ – акумуляторна батарея
ККД – коефіцієнт корисної дії

Вступ. Трансформація глобального енергетичного розвитку та процесів в бік децентралізації зумовлює стрімке впровадження систем електропостачання на основі ВДЕ. Особливе місце в цьому процесі посідають гібридні автономні комплекси, що поєднують різні типи генерації здебільшого електро- та теплової енергії, для забезпечення відповідного рівня надійності енергопостачання віддалених об'єктів, особливо враховуючи регіональний контекст України.

Поняття гібридної системи енергоживлення для автономних об'єктів ґрунтується на спільній роботі різних

джерел енергії: вітроустановок, сонячних електростанцій, геліоколекторів, автономних дизель-бензинових енергоустановок, систем накопичування енергії тощо. Замість використання одного джерела (наприклад, СЕС, ефективність якої мінімальна вночі та суттєво залежить від пори року та погодних умов [1] або тільки ДГУ, робота якого пов'язана із суттєвими експлуатаційними витратами [2]) гібридна система об'єднує в собі декілька систем енергоживлення та накопичення [3]. Зазвичай це комбінація відновлюваних джерел (сонячна енергія та енергія вітру) і традиційного резервного агрегату (ДГУ) або потужного блоку акумуляторів.

Головною перевагою такої системи є безперервне забезпечення енергопостачання об'єктів (побутових, промислових) та висока надійність. Наприклад, у вітряну, але хмарну погоду дефіцит сонячної генерації покривається ВЕУ, а надлишки енергії накопичуються в акумуляторних батареях [4]. Керуванням процесу розподілу, вироблення та споживання енергії такої системи забезпечує ДБЖ під керуванням контролера, який у реальному часі розподіляє потоки енергії.

Використання гібридних систем для живлення автономних об'єктів, приватних будинків та різних віддалених споживачів є практично єдиним способом забезпечення енергоживлення. Це дає змогу не лише економити паливо та ресурс автономного генератора, але й створює гнучку мережу, яка адаптується до зміни погодних умов. Тобто гібридна система є автономною «міні-енергосистемою» [5], яка є екологічно чистою, малошумною та повністю незалежною від центральної мережі.

Аналіз джерел літератури показує [6], що перспективним для використання у складі гібридних систем енергоживлення є ВЕУ, побудовані на базі синхронних генераторів з постійними магнітами [7]. Така ВЕУ може працювати цілодобово, що дає змогу суттєво зменшити ємність АКБ (а отже, і вартість), оскільки енергія надходить рівномірніше протягом доби [8]. У помірних широтах спостерігається ідеальний природний баланс між вітровою та сонячною енергією: взимку, коли сонячна інсоляція мінімальна (короткий світловий день, хмарність, сніг на панелях), активність повітряних мас зазвичай максимальна, при цьому ВЕУ перекидає дефіцит енергії взимку, який є актуальним для автономних систем опалення та освітлення в холодну пору року. Отже, саме наявність ВЕУ забезпечує стабільність базової генерації, запобігаючи розряджанню АКБ до критичного рівня.

Однак проектування гібридних систем супроводжується значними труднощами через складність внутрішніх фізичних процесів: від багатофакторних електромеханічних перетворень до складних перехідних режимів у силових електронних перетворювачах. Це робить неможливим точне прогнозування роботи системи без використання імітаційного моделювання та сучасного програмного забезпечення, яке дає змогу визначити поведінку автономної мережі в різних експлуатаційних режимах.

Впровадження автономних гібридних систем на базі ВЕУ, СЕС, ДГУ тощо для приватного сектору є пріоритетним завдяки відсутності потреби в додатковому збудженні, високому ККД та можливості реалізації безмультиплікаторного (прямого) приводу [9]. Однак головним викликом залишається стохастична природа вітрового потоку. Оскільки енергія вітру постійно змінюється, виникає потреба в динамічній оптимізації швидкості обертання турбіни. Для кожної миттєвої швидкості повітряного потоку існує лише одна точка оптимального відбору потужності [10].

Для вирішення цієї проблеми в сучасних гібридних системах застосовуються інтелектуальні алгоритми керування, зокрема контролери пошуку точки максимальної потужності [11]. Ці пристрої в реальному часі адаптують електричне навантаження генератора до механічного моменту турбіни, забезпечуючи максимальну енергоефективність системи за будь-яких метеоумов [12].

Окрім технічних переваг, розвиток вітроенергетики стимулює локальний економічний розвиток, створюючи нові робочі місця в інженерному та сервісному секторах. Використання чистої енергії вітру дозволяє повністю усунути викиди вуглекислого газу під час експлуатації, що відповідає стратегії сталого розвитку [13].

Невід'ємним елементом сучасної гібридної системи є підсистема акумулювання з АКБ. Використання сучасних літій-залізо-фосфатних накопичувачів (LiFePO₄) дає змогу згладжувати піки генерації та споживання. Такі АКБ мають високий ресурс (понад 3000–5000 циклів заряду / розряду) та термічну стабільність, що гарантує надійну роботу автономної системи протягом десятиліть, зводячи до мінімуму екологічні наслідки [14].

Аналіз сучасних гібридних систем [15] характеризується переходом від аналізу окремих складових такої системи до дослідження процесу їх взаємодії та взаємного впливу. Фундаментальні праці вітчизняних та закордонних учених [16, 17] присвячені питанням інтеграції вітрових та сонячних установок у локальні електромережі. Основна увага дослідників зосереджена на топологіях силових перетворювачів та методах стабілізації напруги й частоти за змінного навантаження, стабільність цих параметрів є актуальною для автономних споживачів.

Також важливим аспектом, що визначає надійність роботи та високі енергетичні показники, є використання як джерела електроенергії електромеханічних перетворювачів з постійними магнітами. Безмультиплікаторне виконання під час реалізації технічних рішень ВЕУ для автономних енергосистем дає змогу зменшити втрати на збудження та підвищити надійність [18]. Однак складність керування такими системами потребує впровадження інтелектуальних алгоритмів [19]. Аналіз джерел свідчить про те, що використання алгоритмів керування є ключовим фактором підвищення ККД системи за низьких швидкостей вітру [20].

Використання в гібридних системах літій-залізо-фосфатних накопичувачів сприяє підвищенню терміну експлуатації обладнання та зростанню швидкості реакції в разі появи пікових навантажень. Проте питання динамічної взаємодії між різними типами джерел та накопичувачів у перехідних режимах все ще потребує глибшого вивчення через імітаційне моделювання.

Актуальність роботи зумовлена необхідністю забезпечення енергетичної стійкості об'єктів в умовах нестабільності централізованих мереж та зростання вартості традиційних енергоносіїв. Впровадження гібридних систем з комбінованими джерелами (ВЕС, системи накопичення з АКБ і традиційні електромеханічні установки

з ДГУ дає змогу мінімізувати вплив стохастичного характеру відновлюваної енергії на споживача. Тому дослідження режимів роботи таких систем є актуальним науково-практичним завданням.

Мета роботи. Дослідження режимів роботи автономної електроенергетичної системи з комбінованими джерелами енергії шляхом чисельного імітаційного моделювання, що дає змогу оцінити взаємодію між різними джерелами генерації та накопичувачами енергії в різних експлуатаційних режимах. Це сприятиме забезпеченню стабільного енергоживлення автономних об'єктів з урахуванням стохастичного характеру відновлюваних джерел енергії.

На рис. 1 наведено конфігурацію пропонованої гібридної системи електроживлення на прикладі забезпечення потреб приватного будинку.



Рис. 1. Гібридна система електроживлення: ДГУ – дизель-генераторна установка; ДБЖ з МРРТ – гібридний напівпровідниковий інвертор з системою МРРТ; ЩЕ – електричний комутаційний щит

Кожен з елементів системи живлення виконує свою функцію. ДГУ виконує роль резервного джерела або використовується за значних пікових навантажень споживача. Вона використовується в тому разі, коли акумулятори розряджені, а сили вітру недостатньо для покриття потреб споживача. Крім того, ДГУ гарантує 100 % автономності системи в будь-яку погоду.

Вітроустановка в пропонованій системі є головним відновлюваним джерелом електроенергії. У цій роботі розглядається безмультіплікаторна ВЕУ із синхронним генератором на постійних магнітах, що генерує змінний струм змінної частоти, який подається на вхід МРРТ контролера ДБЖ. За достатньої сили вітру надлишок потужності використовується для заряджання АКБ. За пікових навантажень чи за слабого вітру недостача потужності покривається за рахунок енергії АКБ.

ДБЖ з МРРТ (гібридний інвертор) є головним елементом цієї системи: забезпечує максимально можливу потужність вітрогенератора за поточної швидкості вітру; перетворює постійну напругу АКБ на змінну; керує зарядом / розрядом АКБ від вітру чи дизель-генератора відповідно до режиму роботи чи навантаження; забезпечує контроль, моніторинг та захист обладнання, системи й навантаження.

АКБ у цій системі виконує важливу функцію енергетичного буфера. Вона накопичує надлишки енергії за достатньої швидкості вітру і віддає її коли є необхідність. Це підвищує плавність роботи системи – відсутні стрибки напруги та суттєві динамічні процеси. В електричному щиті встановлено захисні комутаційні апарати, які розподіляють електроенергію по різних лініях навантаження та захищають обладнання.

Перелік компонентів та складових досліджуваної гібридної системи енергоживлення наведено у табл. 1.

Таблиця 1. Ключові компоненти досліджуваної системи

№	Найменування обладнання	Характеристики	Вартість, \$
1	Гібридний інвертор Deye SUN-20K-SG01HP3-EU-AM2	3 ф, 20 кВт, 2 МРРТ трекари	2500
2	Вітрогенератор PVMARS 10kW	10 кВт, 3-лопатевий, старт при 2,5 м/с	5200
3	Система АКБ Pylontech Force-H2 (4 модулі по 14,2 кВт-год)	LiFePO4, 57 кВт-год, 384 В, >6000 циклів	20000
4	ДГУ Cummins RS20ACE (Silent)	20 кВт, трифазний, шумозахисний кожух, вбудований ATS (автозапуск)	8800
5	ЩЕ Schneider Electric / Hager (Custom)	Автоматика серії Acti9/Volta, ПЗВ, захист від перенапруг (SPD), крос-модулі	1200
6	Всього		37700

Параметри основних компонентів гібридної системи, наведені в табл. 1, використовуються для розробки чисельної імітаційної моделі досліджуваної автономної

електроенергетичної системи. Вибір конкретних компонентів здійснений для автономного енергоживлення приватного заміського будинку за умови одночасного ввімкнення всього потужного обладнання (праска, електрична піч, бойлер, пилосмок і т. ін.). Вибір іншого обладнання принципово не впливає на результати роботи системи.

Матеріали і результати досліджень. Для дослідження режимів роботи та параметрів автономної гібридної системи при зміні параметрів вітру розроблено комплексну чисельну імітаційну модель у програмному середовищі MATLAB/Simulink.

Параметри навколишнього середовища суттєво впливають на роботу гібридної системи та її вихідні параметри. У моделі реалізовано можливість змінювати швидкість вітру й кута встановлення лопатей. Для оцінки адаптивності системи до змінних метеоумов розглядається три випадки моделювання за умови фіксованого значення кута лопатей, що відповідає режиму макси-

мального відбору потужності за номінальних навантажень: режим номінальної генерації за швидкості вітру $v = 6$ м/с, дає змогу оцінити сталу роботу вітроустановки; режим підвищеної інтенсивності при $v = 8$ м/с, що характеризує поведінку системи в умовах надлишкової енергії; режим слабого вітрового потоку при $v = 4$ м/с, що відповідає перевірці роботи системи при мінімальних обертах вітрової турбіни.

Для спрощення проведення розрахунків, для всіх режимів роботи ВЕУ, навантаження приймається $\approx 6,0$ кВт, що відповідає ввімкненню ключових споживачів у години пік приватного будинку.

Оцінка поведінки системи за випадкової зміни швидкості вітру й навантаження, аварійних режимів роботи (перевантаження, коротке замикання і т. ін.) буде проведена авторами цього дослідження в подальших роботах.

На рис. 2 показано структуру чисельної імітаційної моделі автономної гібридної системи енергоживлення.

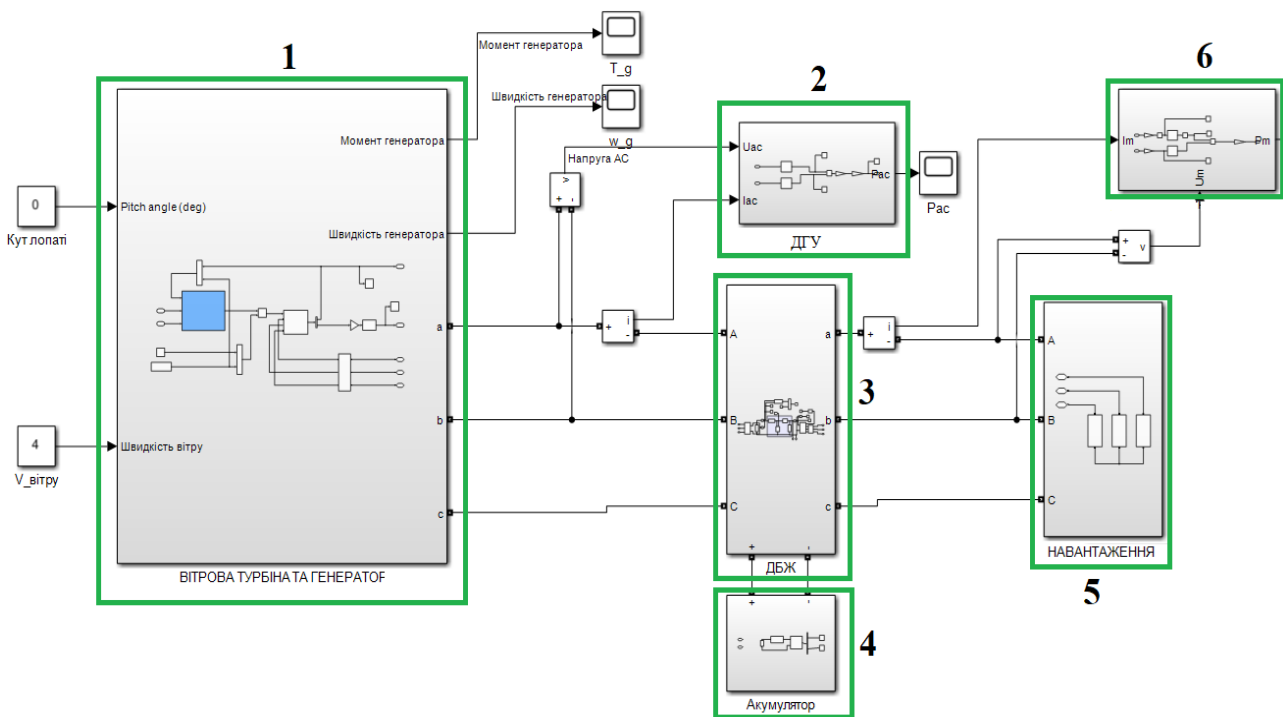


Рис. 2. Структура чисельної імітаційної моделі

На рис. 2 показано: 1 – блок, що відповідає за вітрову турбіну та електрогенератор з постійними магнітами; 2 – блок автономної ДГУ; 3 – блок ДБЖ та МРРТ; 4 – блок, що відповідає за параметри вибраної АКБ; 5 – навантаження системи; 6 – блок, що імітує роботу ЩЕ, тобто виконує роль комутації та захисту навантаження.

Підсистема вітрової турбіни та синхронного генератора з постійними магнітами описується відомими рівняннями та залежностями [21]. Відмінністю розробленої підсистеми вітроустановки є те, що вона дає змогу динамічно перераховувати реальну швидкість обертання вітрової

турбіни залежно від фактичної швидкості обертання вала генератора залежно від його навантаження.

Підсистема ДБЖ з МРРТ здійснює обробку вхідних сигналів та розрахунок величини потужності генерації за таким виразом:

$$P_k = V_{dc(k)} \cdot I_{dc(k)} \quad (1)$$

де: P_k – значення потужності в поточний момент часу; $V_{dc(k)}$ – напруга на шині постійного струму ДБЖ; $I_{dc(k)}$ – величина випрямленого струму МРРТ контролера.

Для визначення динаміки системи використовуються блоки затримки на один такт квантування. Розрахунок диференціалів потужності та напруги між діючими та попередніми значеннями виконується згідно з такими виразами:

$$\begin{aligned} \Delta P &= P_{(k)} - P_{(k-1)}, \\ \Delta V &= V_{dc(k)} - V_{dc(k-1)}. \end{aligned} \quad (2)$$

Вихідна потужність системи в будь-який момент часу t визначається як сума потужностей від усіх наявних джерел:

$$P_{вих}(t) = [P_v(v, t) \cdot \eta_{MPPT} + P_{ДГ}(t) + P_{АКБ}(t)] \cdot \eta_{ДБЖ} \quad (3)$$

де: P_v – потужність вітроустановки (вітрової турбіни та генератора); η_{MPPT} – ККД контролера MPPT; $P_{ДГ}$ – потужність ДГУ; $P_{АКБ} = f(SoC, I_{АКБ})$ – потужність АКБ; $\eta_{ДБЖ}$ – ККД ДБЖ.

Зміна стану заряду АКБ (SoC) описується через диференціальне рівняння, що дає змогу аналізувати динаміку процесу в реальному часі. Швидкість зміни стану

заряду акумулятора, за зміни навантаження чи швидкості вітру, з урахуванням номінальної ємності та коефіцієнта корисної дії визначається в такий спосіб:

$$\frac{dSoC(t)}{dt} = -\frac{I_{АКБ}(t)}{C_n} = -\frac{P_{АКБ}(t) \cdot \eta_{АКБ}}{V_{dc} \cdot C_n} \quad (4)$$

де: $SoC(t)$ – поточний стан заряду АКБ; C_n – номінальна ємність акумулятора; $P_{АКБ}$ – миттєва потужність на затишках АКБ; $\eta_{АКБ}$ – коефіцієнт корисної дії циклу заряду / розряду.

Для практичного аналізу результатів чисельного моделювання зручно використовувати інтегральну форму за певний проміжок часу $[t_0, t]$:

$$dSoC(t) = dSoC(t_0) - \frac{1}{C_n} \int_{t_0}^t \eta_{АКБ} \cdot P_{АКБ}(t) dt \quad (5)$$

Проведемо аналіз роботи системи за швидкості вітру 6,0 м/с, використовуючи розроблену чисельну імітаційну модель.

На рис. 3 показано результати розрахунку потужностей основних елементів досліджуваної системи.

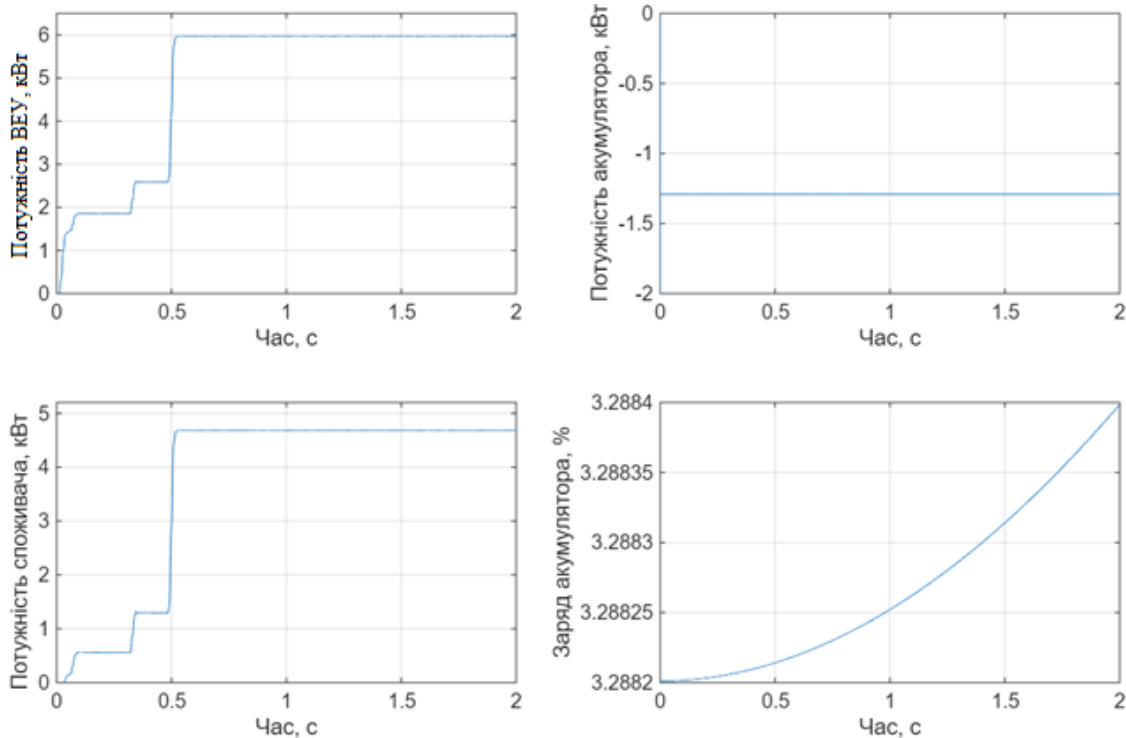


Рис. 3. Результати розрахунку за швидкості вітру 6 м/с

На рис. 3 видно, що вітроустановка при заданій швидкості вітру розвиває максимальну потужність $\approx 6,0$ кВт, при цьому потужність споживача становить 4,7 кВт. Надлишок потужності $\approx 1,3$ кВт використовується для заряджання АКБ, що підтверджується відповідним графіком на рис. 3. Та збільшенням рівня заряду АКБ у відсотках.

За низьких величин швидкості вітру (< 4 м/с) недостача потужності насамперед компенсується за рахунок енергії АКБ. Автономна ДГУ автоматично запускається в разі падіння рівня заряду АКБ нижче 20 %, для запобігання їх глибокого розряду та пошкодження.

Результат розрахунку потужності системи за швидкості вітру 4 м/с показано на рис. 4.

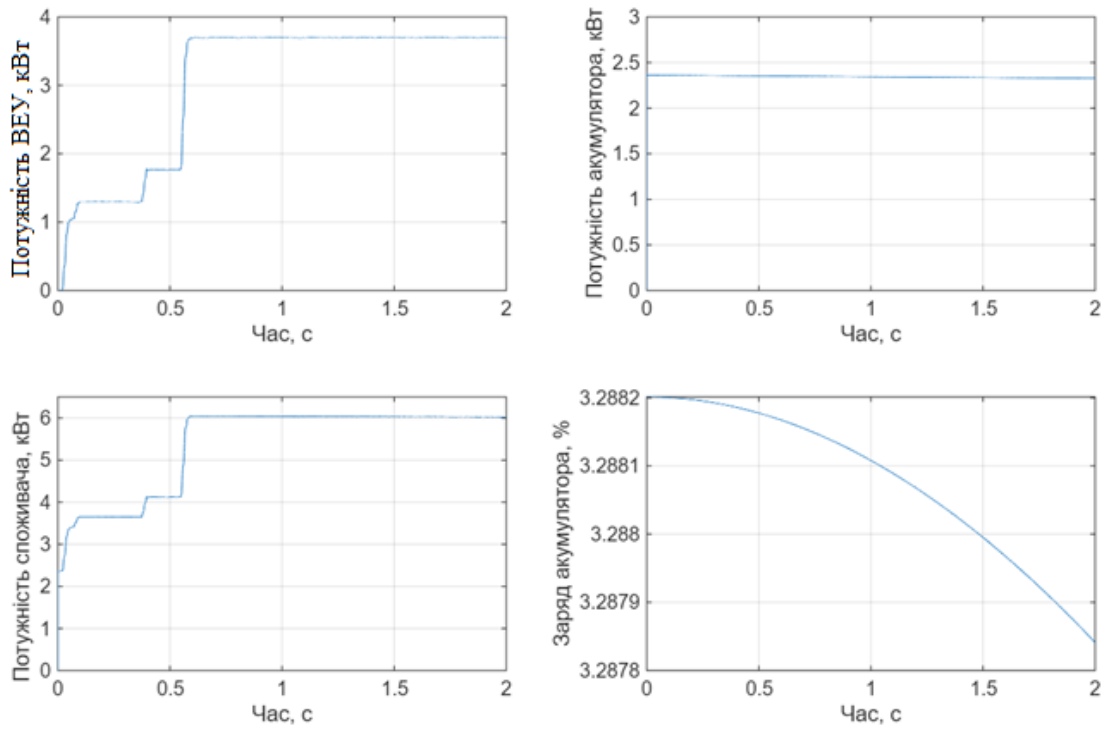


Рис. 4. Результати розрахунку за швидкості вітру 4 м/с

На рис. 4 видно, що потужність споживача, у конкретний момент часу, становить $\approx 6,0$ кВт. При цьому потужність вітроустановки становить 3,6 кВт. Недостача потужності споживача компенсується за рахунок енергії, накопиченої в АКБ, і становить $\approx 2,4$ кВт. При цьому по графіку на рис. 4 видно, що відбувається розряд АКБ.

Поведінка системи на часовому інтервалі до 0,5 с (рис. 3, 4) пояснюється особливостями розрахункових процесів в імітаційній моделі.

На рис. 5 показано результати моделювання при використанні резервної ДГУ.

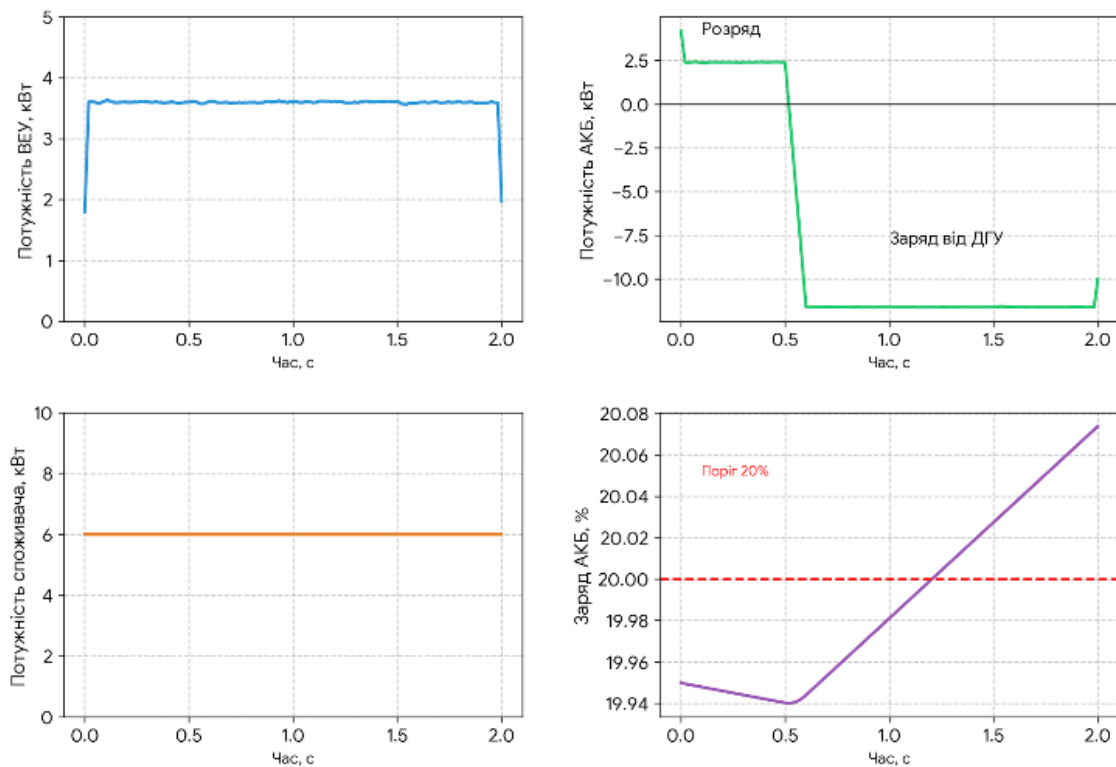


Рис. 5. Результати моделювання при використанні резервної ДГУ

Як видно на рис. 5, у момент часу $t = 0,5$ с, коли рівень заряду АКБ перетинає критичну позначку SoC у 20 %, система автоматично вмикає дизель-генератор. Робоча потужність ДГУ 14 кВт відповідає 70 % номінальної потужності генератора, що забезпечує оптимальні питомі енерговитрати палива. Потужність ДГУ перевищує поточну потужність споживача у 6,0 кВт та його дефіцит у 2,4 кВт, тож більша частина енергії спрямовується на заряд акумуляторів. Це відображено на графіку потужності АКБ, де крива переходить у від'ємну область зі значенням $-11,6$ кВт, що відповідає інтенсивному заряду. З цього

моменту рівень заряду батареї (SoC) починає стрімко зростати. Такий підхід до використання енергії ДГУ дає змогу прискорити процес заряджання АКБ та підвищити ефективність використання енергії палива за рахунок роботи генератора в оптимальному режимі навантаження.

Використання ВЕУ також сприяє істотній економії палива, ресурсу та експлуатаційних витат, пов'язаних з роботою ДГУ. У табл. 2 наведено порівняння експлуатаційних показників досліджуваної системи енергопостачання при використанні ВЕУ сумісно з ДГУ.

Таблиця 2. Порівняння експлуатаційних показників систем енергопостачання

Параметр порівняння	Лише ДГУ (без ВЕУ та АКБ)	Гібридна система (ДГУ + ВЕУ + АКБ)	Економічний ефект
Режим роботи ДГУ	Постійний (24 год)	Періодичний (~5,5 год/добу)	-77 % часу роботи
Середнє навантаження на ДГУ	≈6 кВт (30 % від ном.), неефективно	≈14 кВт (70 % від ном.), оптимально	+40 % до ККД двигуна
Добова генерація від вітру	0 кВт·год	≈86 кВт·год	Екологічно чиста енергія
Добова витрата палива	~72,0 л	~25,0 л	~60,5 % (47,0 л)
Витрати на ТО (ум. од)	100 %	23 %	Скорочення у 4,3 раза

Сумарна добова витрата палива може бути розрахована при визначенні графіку зміни швидкості вітру протягом доби (місяця, року) і визначається в такий спосіб:

$$Q = \int_0^{T_{ДГУ}} (q_{ДГУ} \cdot P_{ДГУ}) dt \quad (6)$$

де: $T_{ДГУ}$ – час роботи генератора за добу (год), який у гібридній системі розраховується:

$$T_{ДГУ} = \frac{E_l - E_w}{P_{ДГУ} \cdot \eta_{АКБ}} \quad (7)$$

де: $q_{ДГУ}$ – питома витрата палива (л/кВт·год), що залежить від навантаження; E_l та E_w – добова енергія споживання та генерації від енергії вітру, відповідно.

Аналіз даних табл. 2 показує, що основна економія досягається не лише за рахунок прямого заміщення паливної енергії енергією вітру, але й завдяки зміщенню робочої точки ДГУ в зону максимального ККД (70–80 % номінальної потужності). У системі лише з ДГУ генератор працює при низькій потужності для покриття середнього навантаження ≈6 кВт, що призводить до перевитрати палива та прискореного закоксовування двигуна. У гібридній схемі ДГУ працює за потужності 14 кВт, що дає змогу за короткий час зарядити АКБ та забезпечити подальшу роботу системи в безшумному режимі.

Висновки

Внаслідок виконання цієї роботи проведено комплексне дослідження режимів роботи гібридної автономної системи електроживлення, що поєднує вітроенергетич-

ну установку на базі СГПМ, ДГУ та систему накопичення енергії з АКБ. Результати імітаційного моделювання дають підстави вважати, що:

Впровадження системи ДБЖ з МРРТ-контролером дає змогу оптимізувати відбір потужності від вітроустановки в широкому діапазоні швидкостей вітру $v = 4...10$ м/с. Це забезпечує пріоритетне використання відновлюваної енергії та мінімізує цикли роботи паливного генератора.

Завдяки комбінованому режиму, за якого ДГУ використовується лише при досягненні порогу розряду АКБ (SoC < 20 %), можливо не лише забезпечити пікове навантаження 20 кВт, а й забезпечувати інтенсивне заряджання АКБ. Це скорочує загальний час роботи двигуна внутрішнього згоряння та дає змогу досягти економії палива на рівні 45–60 % порівняно з безперервною експлуатацією генератора.

Застосування LiFePO₄ АКБ як накопичувача енергії дає змогу ефективно згладжувати стохастичні коливання вітрової генерації та забезпечувати безперебійне живлення споживача. Це значно знижує динамічні навантаження на механічні частини вітроустановки та ДГУ, подовжуючи їх ресурс.

Окрім економічних переваг, запропонована конфігурація суттєво зменшує обсяги шкідливих викидів продуктів згоряння та кількість відпрацьованого мастила, що робить систему придатною для використання в екологічно чутливих автономних зонах.

ПОСИЛАННЯ

1. Rekioua, D., Mokrani, Z., Kakouche, K. et al. Optimization and intelligent power management control for an autonomous hybrid wind turbine photovoltaic diesel generator with batteries. *Sci Rep* 13, 21830 (2023). <https://doi.org/10.1038/s41598-023-49067-4>.
2. Zoubir Roumila, Djamila Rekioua, Toufik Rekioua, Energy management based fuzzy logic controller of hybrid system wind/photovoltaic/diesel with storage battery, *International Journal of Hydrogen Energy*, Volume 42, Issue 30, 2017, Pages 19525-19535, ISSN 0360-3199, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.06.006>.
3. Saloua Belaid, Djamila Rekioua, Adel Oubelaid, Djamel Ziane, Toufik Rekioua, A power management control and optimization of a wind turbine with battery storage system, *Journal of Energy Storage*, Volume 45, 2022, 103613, ISSN 2352-152X, <https://doi.org/10.1016/j.est.2021.103613>.
4. Maulik, A. and Das, D. (2019), Optimal power dispatch considering load and renewable generation uncertainties in an AC–DC hybrid microgrid. *IET Gener. Transm. Distrib.*, 13: 1164-1176. <https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2018.6502>.
5. X. Liu, P. Wang and P. C. Loh, "A Hybrid AC/DC Microgrid and Its Coordination Control," in *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 2, no. 2, pp. 278-286, June 2011, doi: 10.1109/TSG.2011.2116162
6. Zoubir Roumila, Djamila Rekioua, Toufik Rekioua, Energy management based fuzzy logic controller of hybrid system wind/photovoltaic/diesel with storage battery, *International Journal of Hydrogen Energy*, Volume 42, Issue 30, 2017, Pages 19525-19535, ISSN 0360-3199, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.06.006>.
7. Khan, M. A., Zeb, K., Sathishkumar, P., Ali, M. U., Uddin, W., Hussain, S., Ishfaq, M., Khan, I., Cho, H.-G., & Kim, H.-J. (2018). A Novel Supercapacitor/Lithium-Ion Hybrid Energy System with a Fuzzy Logic-Controlled Fast Charging and Intelligent Energy Management System. *Electronics*, 7(5), 63. <https://doi.org/10.3390/electronics7050063>.
8. Aziz, A. S., Tajuddin, M. F. N., Adzman, M. R., Ramli, M. A. M., & Mekhilef, S. (2019). Energy Management and Optimization of a PV/Diesel/Battery Hybrid Energy System Using a Combined Dispatch Strategy. *Sustainability*, 11(3), 683. <https://doi.org/10.3390/su11030683>.
9. Chumack, V., Tsyvinskyi, S., Kovalenko, M., Ponomarev, A., Tkachuk, I. 2020. Mathematical modeling of a synchronous generator with combined excitation. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1, 5 (103) (Feb. 2020), 30–36. doi: 10.15587/1729-4061.2020.193495.
10. Головка В. М., Коваленко М. А., Коваленко І. Я., Галасун І. Р. Математичне моделювання автономної вітроустановки з синхронним генератором магніто-електричного типу. *Відновлювальна енергетика*. 2020. № 4(63), С. 50–58. doi: 10.36296/1819-8058.2020.4(63).
11. Yuan, H., Liu, J., Zhou, Y., & Pei, H. (2023). State of Charge Estimation of Lithium Battery Based on Integrated Kalman Filter Framework and Machine Learning Algorithm. *Energies*, 16(5), 2155. <https://doi.org/10.3390/en16052155>.
12. Yimen, N., Tchotang, T., Kanmogne, A., Abdelkhalikh Idriss, I., Musa, B., Aliyu, A., Okonkwo, E. C., Abba, S. I., Tata, D., Meva'a, L., Hamandjoda, O., & Dagbasi, M. (2020). Optimal Sizing and Techno-Economic Analysis of Hybrid Renewable Energy Systems—A Case Study of a Photovoltaic/Wind/Battery/Diesel System in Fanisau, Northern Nigeria. *Processes*, 8(11), 1381. <https://doi.org/10.3390/pr8111381>.
13. Ge Zhang, Yong Shi, Akbar Maleki, Marc A. Rosen, Optimal location and size of a grid-independent solar/hydrogen system for rural areas using an efficient heuristic approach, *Renewable Energy*, Volume 156, 2020, Pages 1203-1214, ISSN 0960-1481, <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.04.010>.
14. Ge Zhang, Yong Shi, Akbar Maleki, Marc A. Rosen, Optimal location and size of a grid-independent solar/hydrogen system for rural areas using an efficient heuristic approach, *Renewable Energy*, Volume 156, 2020, Pages 1203-1214, ISSN 0960-1481, <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.04.010>
15. Barun K. Das, Majed A. Alotaibi, Pronob Das, M.S. Islam, Sajal K. Das, Md Alamgir Hossain, Feasibility and techno-economic analysis of stand-alone and grid-connected PV/Wind/Diesel/Batt hybrid energy system: A case study, *Energy Strategy Reviews*, Volume 37, 2021, 100673, ISSN 2211-467X, <https://doi.org/10.1016/j.esr.2021.100673>.
16. Коваленко, М. А., Реуцький, М. О., Коваленко, І. Я., Базаров, О. О., & Тітов, Є. О. (2025). Використання джерела безперебійного живлення для зниження експлуатаційних витрат автономного електрогенератора. *Відновлювана енергетика*, 1(80), 29-37. [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2025.1\(80\).29-37](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2025.1(80).29-37).
17. Katsadze, T., Chyzhevskiy, V., Kovalenko, M., Chumack, V., & Buslova, N. (2025). Normalization of non-sinusoidality indicators of magnetoelectric generator under an autonomous mode of operation. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3(8

- (135), 34–41. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2025.332187>.
18. Djaafar Toumi, Djiliani Benattous, Ahmed Ibrahim, H.I. Abdul-Ghaffar, Sergey Obukhov, Raef Aboelsaud, Yacine Labbi, Ahmed A. Zaki Diab, Optimal design and analysis of DC–DC converter with maximum power controller for stand-alone PV system, *Energy Reports*, Volume 7, 2021, Pages 4951-4960, ISSN 2352-4847, <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2021.07.040>.
19. Hanane Hassani, Faika Zaouche, Djamilia Rekioua, Saloua Belaid, Toufik Rekioua, Seddik Bacha, Feasibility of a standalone photovoltaic/battery system with hydrogen production, *Journal of Energy Storage*, Volume 31, 2020, 101644, ISSN 2352-152X, <https://doi.org/10.1016/j.est.2020.101644>.
20. Tiewei Song, Lijun Fu, Linlin Zhong, Yaxiang Fan, Qianyi Shang, HP3O algorithm-based all electric ship energy management strategy integrating demand-side adjustment, *Energy*, Volume 295, 2024, 130968, ISSN 0360-5442, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.130968>.
21. Mohammadamin Shirkhani, Jafar Tavoosi, Saeed Danyali, Amirhossein Khosravi Sarvenoe, Ali Abdali, Ardashir Mohammadzadeh, Chunwei Zhang, A review on microgrid decentralized energy/voltage control structures and methods, *Energy Reports*, Volume 10, 2023, Pages 368-380, ISSN 2352-4847, <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2023.06.022>.

OPERATING MODES OF A HYBRID AUTONOMOUS ELECTRIC POWER SYSTEM WITH COMBINED ENERGY SOURCES

Received Feb. 23, 2026; accepted Jun. 26, 2026
Available online June. 30, 2026

**Kovalenko M.¹, Ostapchuk O.², Kovalenko I.³,
Trukhanov O.⁴, Vyshnevsky O.⁵**

Author for correspondence: Kovalenko Mykhailo,
e-mail: kovalenko87ma@gmail.com

Abstract. *The paper analyzes the operating modes of an autonomous hybrid power supply system based on the combined use of wind energy with a permanent magnet synchronous generator, a diesel generator set, and a storage system with batteries. The relevance of implementing such systems for private households with high peak loads (up to 20 kW) in the absence of centralized power supply is substantiated. A numerical simulation model has been developed that allows assessing the dynamics of power distribution between sources depending on wind speed and battery charge status. Power distribution dependencies have been constructed at different wind speeds and different battery charge levels. It is shown that the use of a hybrid inverter with MPPT in combination with LiFePO4 batteries allows minimizing the operating time of the fuel generator, using it only when the critical battery discharge threshold (less than 20%) is reached. It has been established that the operation of the diesel generator in the mode of forced battery charging at a power of 70–80% of the nominal provides a significant reduction in specific fuel consumption and an extension of the engine's service life. The introduction of a wind generator with intelligent charge control allows achieving fuel and lubricant savings of 45–65% compared to traditional power supply schemes. The proposed model can be used to de-sign highly efficient autonomous power supply systems.*

Keywords: *hybrid power system, wind generator, diesel generator, simulation modeling, uninterruptible power supply, battery.*

List of used designations and abbreviations

RES – renewable energy sources
diesel generator set
UPS – uninterruptible power supply
wind turbines – wind power plants

solar power plant – solar power plant
battery – accumulator battery
efficiency – efficiency factor

Introduction. The transformation of global energy development and processes towards decentralization leads to the rapid introduction of electricity supply systems based on RES. A special place in this process is occupied by hybrid autonomous complexes combining different types of generation, in most cases electric and thermal energy, to ensure an appropriate level of reliability of power supply to remote facilities, especially given the regional context of Ukraine.

The concept of a hybrid power supply system for autonomous facilities is based on the joint operation of various energy sources: wind turbines, solar power plants, solar collectors, autonomous diesel-gasoline power plants, energy storage systems, etc. Instead of using a single source (for example, a solar power plant whose efficiency is minimal at

night and significantly depends on the time of year and weather conditions [1] or only a diesel generator, the operation of which is associated with significant operating costs [2]), a hybrid system combines several power supply and storage systems [3]. This is usually a combination of renewable sources (solar and wind energy) and a traditional backup unit (DGU) or a powerful battery pack.

The main advantage of such a system is the continuous provision of power supply to facilities (domestic, industrial) and high reliability. For example, in windy but cloudy weather, the deficit of solar generation is covered by wind turbines, and excess energy accumulates in batteries [4]. The control of the process of distributing, generating and consuming energy of such a system is provided by a UPS controlled by a controller that distributes energy flows in real time.

¹ Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof
<https://orcid.org/0000-0002-5602-2001>

² Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof
<https://orcid.org/0000-0003-1870-2222>

³ PhD, assistant
<https://orcid.org/0000-0003-1097-2041>

⁴ PhD-student
<https://orcid.org/0009-0008-8491-2678>

⁵ PhD-student
<https://orcid.org/0009-0007-8222-7477>

^{1, 2, 3, 4, 5} NTUU "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine

² Leading Researcher, Department No. 1 of Integrated Energy Systems, Institute of Renewable Energy, NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine

The use of hybrid systems to power autonomous facilities, private houses and various kinds of remote consumers is practically the only way to provide power supply. This allows not only to save fuel and the resource of an autonomous generator, but also creates a flexible network that adapts to changing weather conditions. That is, a hybrid system is an autonomous "mini-power system" [5], which is environmentally friendly, low-noise and completely independent of the central grid.

The analysis of literature sources shows [6] that wind turbines built on the basis of synchronous generators with permanent magnets are promising for use as part of hybrid power supply systems [7]. Such a wind turbine can operate around the clock, which can significantly reduce the capacity of the battery (and therefore the cost), since the energy is supplied more evenly throughout the day [8]. In temperate latitudes, there is an ideal natural balance between wind and solar energy: in winter, when solar insolation is minimal (short daylight hours, cloudiness, snow on panels), the activity of air masses is usually maximum, while wind turbines cover the energy deficit in winter, which is relevant for autonomous heating and lighting systems in the winter season. Therefore, it is the presence of wind turbines that ensures the stability of the base generation, preventing the battery from being discharged to a critical level.

However, the design of hybrid systems is accompanied by significant difficulties due to the complexity of internal physical processes: from multifactor electromechanical transformations to complex transient modes in power electronic converters. This makes it impossible to accurately predict the operation of the system without the use of simulation modeling and modern software that allows you to determine the behavior of the autonomous network in different operating modes.

The introduction of autonomous hybrid systems based on wind turbines, solar power plants, diesel generators, etc., is a priority for the private sector due to the absence of the need for additional excitation, high efficiency and the possibility of implementing a non-multiplier (direct) drive [9]. However, the main challenge remains the stochastic nature of the wind flow. Since wind energy is constantly changing, there is a need to dynamically optimize the turbine rotation speed. For each instantaneous airflow velocity, there is only one point of optimal power take-off [10].

To solve this problem, modern hybrid systems use intelligent control algorithms, in particular maximum power point search controllers [11]. These devices adapt the electrical load of the generator to the mechanical torque of the turbine in real time, ensuring maximum energy efficiency of the system in all weather conditions [12].

In addition to technical advantages, the development of wind energy stimulates local economic development, creating new jobs in the engineering and service sectors. The use of clean wind energy allows for the complete elimination of carbon dioxide emissions during operation, which is in line with the sustainable development strategy [13].

An integral element of a modern hybrid system is a battery storage subsystem. The use of modern lithium iron phosphate storage (LiFePO₄) allows smoothing out generation and consumption peaks. Such batteries have a high resource (more than 3000-5000 charge/discharge cycles) and thermal stability, which guarantees reliable operation of the autonomous system for decades, minimizing environmental consequences [14].

The analysis of modern hybrid systems [15] is characterized by a transition from the analysis of individual components of such a system to the study of the process of their interaction and mutual influence. Fundamental works of domestic and foreign scientists [16, 17] are devoted to the integration of wind and solar installations into local power grids. The main attention of researchers is focused on the topologies of power converters and methods for stabilizing voltage and frequency under alternating load, the stability of these parameters is relevant for autonomous consumers.

Also, an important factor that determines the reliability of operation and high energy performance is the use of electromechanical converters with permanent magnets as a source of electricity. When implementing technical solutions of wind turbines for autonomous power systems, the use of a non-multiplier design allows you to reduce excitation losses and increase reliability [18]. However, the complexity of controlling such systems requires the introduction of intelligent algorithms [19]. Analysis of sources indicates that the use of control algorithms is a key factor in increasing the efficiency of the system at low wind speeds [20].

The use of lithium iron phosphate drives in hybrid systems allows you to increase the service life of the equipment and provide a better reaction speed when peak loads occur. However, the issue of dynamic interaction between different types of sources and drives in transient modes still needs to be studied more deeply through simulations.

The relevance of the work is due to the need to ensure the energy stability of facilities in the conditions of instability of centralized networks and the increase in the cost of traditional energy carriers. The introduction of hybrid systems with combined sources (wind farms, battery storage systems and traditional electromechanical installations with diesel generators) allows minimizing the impact of the stochastic nature of renewable energy on the consumer. Therefore, the study of the modes of operation of such systems is an urgent scientific and practical task.

Purpose of the work. Study of the operating modes of an autonomous electric power system with combined energy sources by means of numerical simulation modeling, which allows assessing the interaction between different sources of generation and energy storage under different operating modes. This will ensure a stable power supply to autonomous facilities in the conditions of the stochastic nature of renewable energy sources.

Fig. 1 shows the configuration of the proposed hybrid power supply system on the example of meeting the needs of a private house.

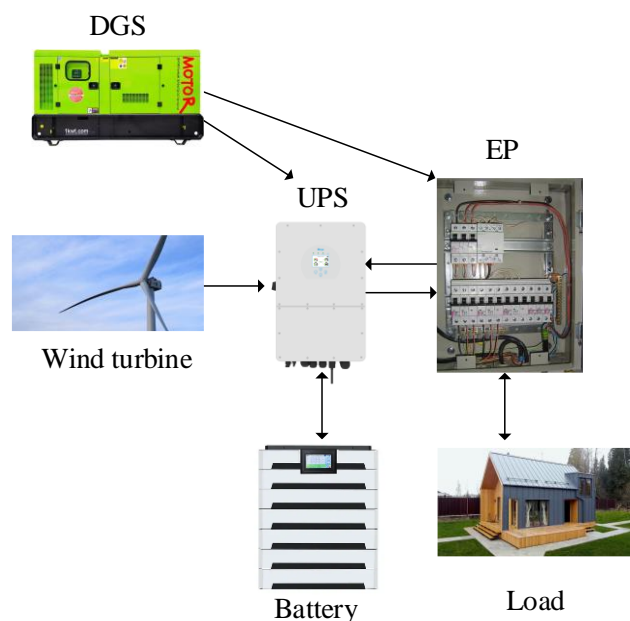


Fig. 1. Hybrid power supply system: DGS – diesel generator system; UPS with MPPT – hybrid semiconductor inverter with MPPT system; EP – electrical panel switchboard

Each element of the power supply system performs its own function. The diesel generator acts as a backup source or is used at significant peak loads of the consumer. It is used when the batteries are discharged, and the wind force is not enough to cover the needs of the consumer. In addition, the diesel generator guarantees 100% autonomy of the system in any bad weather.

The wind turbine in this system is the main renewable source of electricity. This paper discusses a multiplierless wind turbine with a synchronous generator on permanent magnets, generating alternating frequency current, which is supplied to the MPPT input of the UPS controller. With sufficient wind strength, excess power is used to charge the battery. At peak loads or in light winds, the lack of power is covered by battery energy.

A UPS with MPPT (hybrid inverter) is the main element of this system: it provides the maximum possible power of the wind turbine at the current wind speed; converts constant battery voltage into alternating voltage; controls the charge/discharge of the battery from the wind or diesel generator in accordance with the mode of operation or load; Provides control, monitoring and protection of equipment, systems and loads.

The battery in this system performs an important function of an energy buffer. It accumulates excess energy, at sufficient wind speed, or gives it away when necessary. This increases the smoothness of the system, without power surges and significant dynamic processes. Protective switching devices are installed in the electrical panel, which

distribute electricity along different load lines and protect equipment.

The list of components of the studied hybrid power supply system is given in Table 1.

Table 1. Key components of the investigated system

No	Equipment name	Specifications	Cost, \$
1	Hybrid Inverter Deye SUN-20K-SG01HP3-EU-AM2	3 f, 20 kW, 2 MPPT trackers	2500
2	Wind generator PVMARS 10kW	10 kW, 3-blade, start at 2.5 m/s	5200
3	Battery system Pylontech Force-H2 (4 x 14.2 kWh modules)	LiFePO4, 57 kWh, 384 V, >6000 cycles	20000
4	DSU Cummins RS20ACE (Silent)	20 kW, three-phase, noise shield, built-in ATS (autostart)	8800
5	EP Schneider Electric / Hager (Custom)	Automation of the Acti9/Volta series, RCDs, surge protection (SPD), cross-modules.	1200
6	Total		37700

The parameters of the main components of the hybrid system, which are given in Table 1, are used to develop a numerical simulation model of the autonomous electric power system under study. The choice of specific components is carried out for autonomous power supply of a private country house, provided that all powerful equipment (iron, electric stove, boiler, vacuum cleaner, etc.) is turned on at the same time. The choice of other equipment fundamentally affects the results of the system.

Materials and results. To study the operating modes and parameters of an autonomous hybrid system when wind parameters change, a complex numerical simulation model has been developed in the MATLAB/Simulink software environment.

Environmental parameters significantly affect the operation of a hybrid system and its initial parameters. The model implements the ability to change the wind speed and the angle of installation of the blades. To assess the adaptability of the system to variable weather conditions, three simulation cases are considered under the condition of a fixed value of the blade angle, which corresponds to the mode of maximum power take-off at nominal loads: the mode of nominal generation at wind speed $v = 6$ m/s, allows you to evaluate the stable operation of the wind turbine; the mode of increased intensity at $V = 8$ m/s, which characterizes the behavior of the system under conditions

of excess energy; Low wind flow mode at $V = 4$ m/s, which corresponds to checking the operation of the system at minimum wind turbine speeds.

To simplify calculations, for all modes of operation of the wind turbine, the load is taken ≈ 6.0 kW, which corresponds to the switching on of key consumers during the peak hours of a private house.

Assessment of the behavior of the system in case of random changes in wind speed and load, emergency operating modes (overload, short circuit, etc.) will be carried out by the authors of this study in further work.

Fig. 2 shows the structure of a numerical simulation model of an autonomous hybrid power supply system.

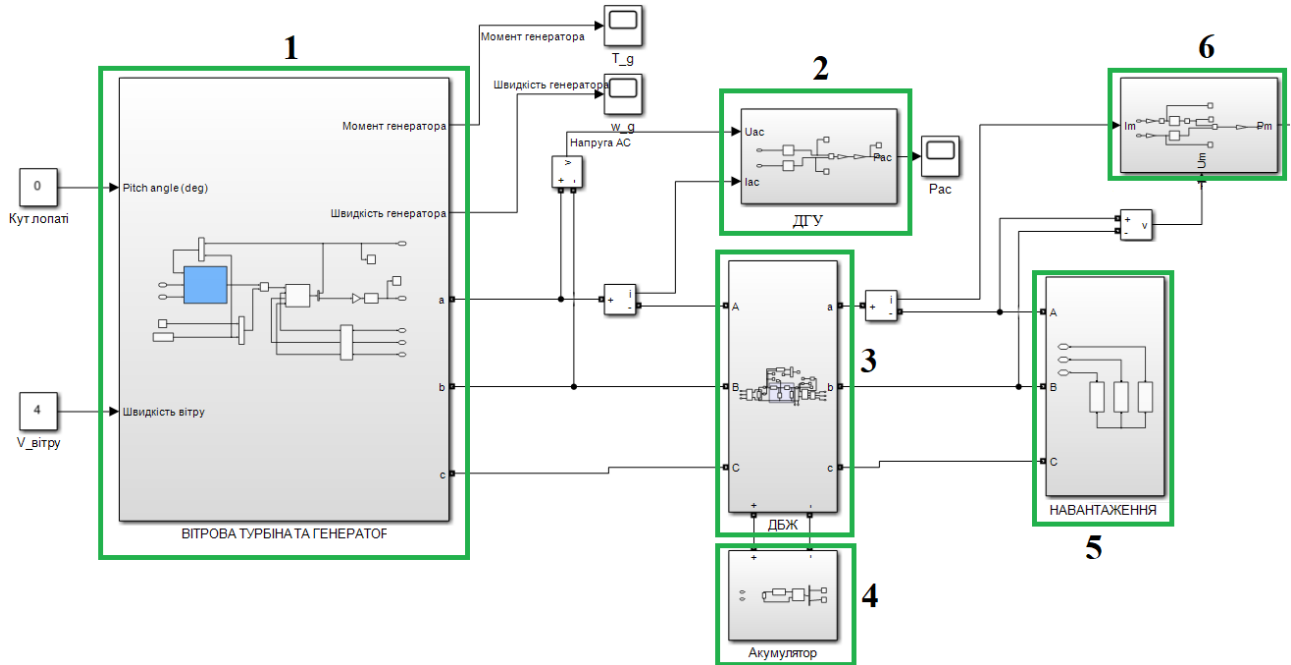


Fig. 2. Structure of the numerical simulation model

Fig. 2 shows: 1 - the unit responsible for the wind turbine and the electric generator with permanent magnets; 2 – autonomous diesel generator unit; 3 - UPS and MPPT unit; 4 - the block responsible for the parameters of the selected battery; 5 – system load; 6 - a block that simulates the operation of SHCCE, that is, it acts as a switching and load protection.

The subsystem of a wind turbine and a synchronous generator with permanent magnets is described by known equations and dependencies [21]. The difference between the developed wind turbine subsystem is that it allows you to dynamically recalculate the real rotation speed of the wind turbine depending on the actual rotation speed of the generator shaft, depending on its load.

The MPPT UPS subsystem processes input signals and calculates the generation power using the following expression:

$$P_k = V_{dc(k)} \cdot I_{dc(k)} \quad (1)$$

where: P_k is the power value at the current time; $V_{dc(k)}$ is the voltage on the DC bus of the UPS; $I_{dc(k)}$ is the value of the rectified current MPPT of the controller.

To determine the dynamics of the system, delay blocks per one quantization cycle are used. The calculation of power differentials and voltages between the current and previous values is performed according to the following expressions:

$$\begin{aligned} \Delta P &= P_{(k)} - P_{(k-1)}, \\ \Delta V &= V_{dc(k)} - V_{dc(k-1)}. \end{aligned} \quad (2)$$

The output power of the system at any point in time t is defined as the sum of the capacities from all available sources:

$$P_{out}(t) = [P_w(v, t) \cdot \eta_{mppt} + P_{DG}(t) + P_B(t)] \cdot \eta_{UPS} \quad (3)$$

where: P_w – is the power of the wind turbine (wind turbine and generator); η_{MPPT} – efficiency of the MPPT controller; P_{DG} – diesel generator power; $P_B = f(\text{SoC}, I_B)$ – battery power; η_{UPS} – UPS efficiency.

The change in the state of charge of the battery (SoC) is described through a differential equation that allows you to analyze the dynamics of the process in real time. The rate of change in the state of charge of the battery, when the load or wind speed changes, taking into account the rated capacity and efficiency, is determined as follows:

$$\frac{d\text{SoC}(t)}{dt} = -\frac{I_B(t)}{C_r} = -\frac{P_B(t) \cdot \eta_B}{V_{dc} \cdot C_r} \quad (4)$$

where: $\text{SoC}(t)$ – s the current state of charge of the battery; C_r – rated battery capacity; P_B – instantaneous battery power; η_B – efficiency of the charge/discharge battery cycle.

For practical analysis of the results of numerical modeling, it is convenient to use the integral form for a certain period of time $[t_0, t]$:

$$dSoC(t) = dSoC(t_0) - \frac{1}{C_r} \int_{t_0}^t \eta_B \cdot P_B(t) dt \quad (5)$$

We will analyze the operation of the system at a wind speed of 6.0 m/s, using the developed numerical simulation model.

Fig. 3 shows the results of calculating the capacities of the main elements of the study system.

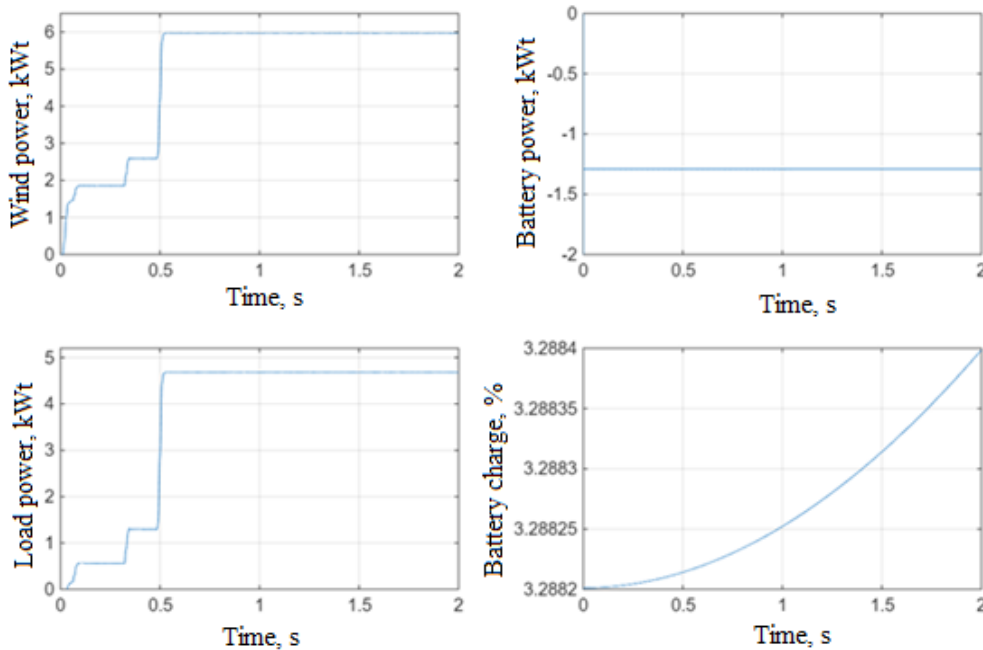


Fig. 3. Calculation results at a wind speed 6 m/s

According to Fig. 3 shows that the wind turbine at a given wind speed develops a maximum power of ≈ 6.0 kW, while the consumer power is 4.7 kW. Excess power ≈ 1.3 kW is used to charge the battery, which is confirmed by the corresponding graph in Fig. 3. And an increase in the battery charge level in %.

At low wind speeds (<4 m/s), the lack of power, first of all,

is compensated for by the energy of the battery. The autonomous diesel generator automatically starts when the battery charge level drops below 20% to prevent deep discharge and damage.

The result of calculating the power of the system at a wind speed of 4 m/s is shown in Fig. 4.

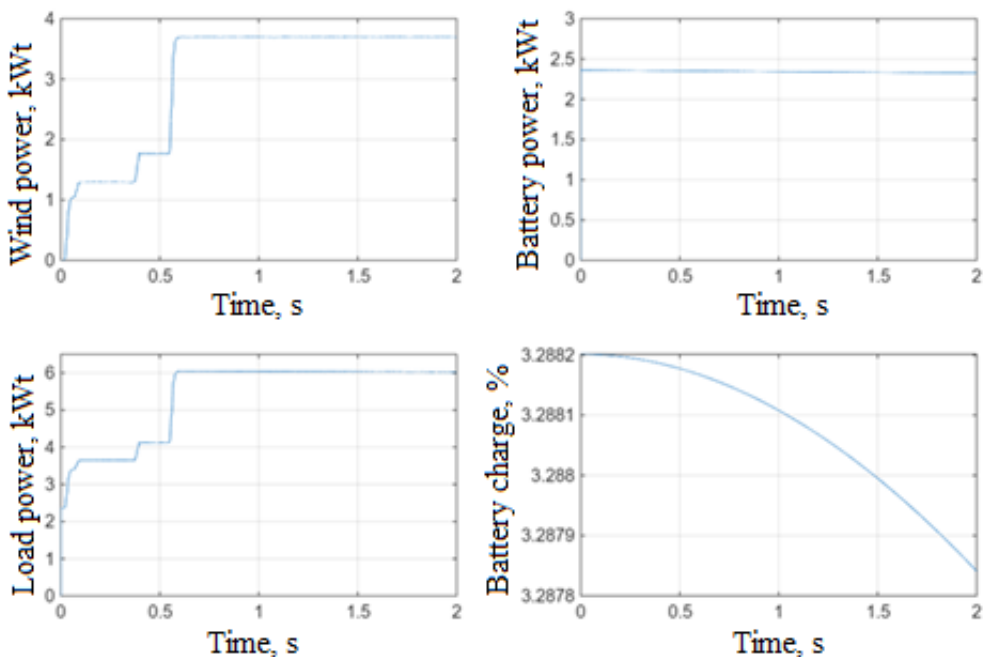


Fig. 4. Calculation results at a wind speed 4 m/s

Fig. 4 shows that the power of the consumer, at a given time, is ≈ 6.0 kW. At the same time, the power of the wind turbine is 3.6 kW. The lack of consumer power is compensated for by the energy accumulated in the battery and is ≈ 2.4 kW. At the same time, according to the graph in Fig. 4, it can be seen that the battery is discharged. The behavior

of the system at a time interval of up to 0.5 s (Figs. 3, 4) is explained by the peculiarities of the calculation processes in the simulation model.

Fig. 5 shows the results of simulation when using a backup diesel generator.

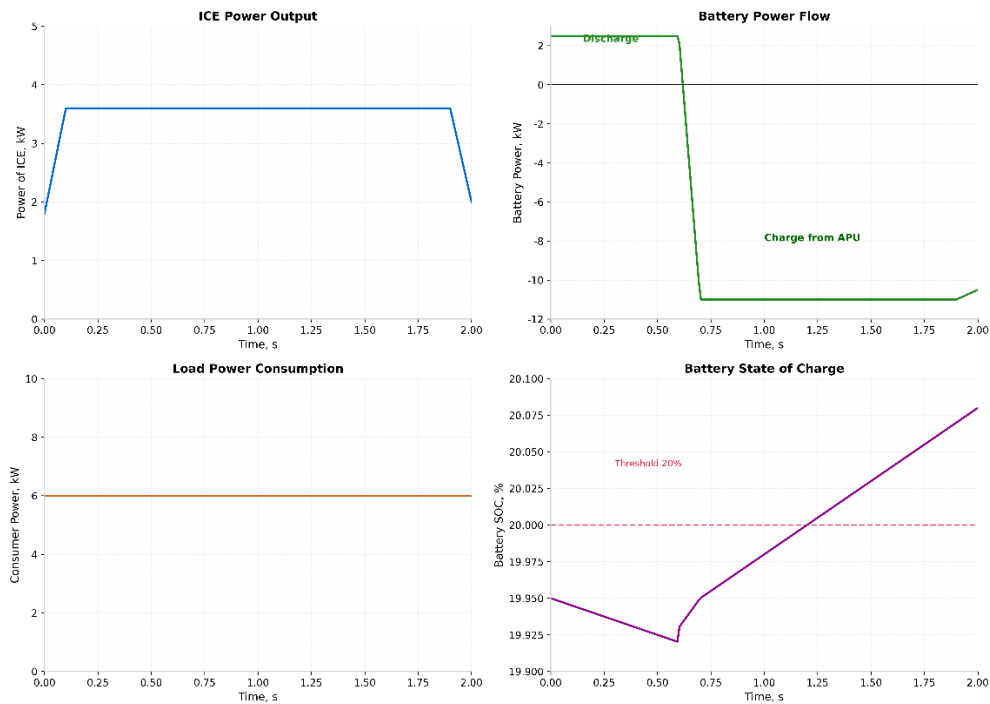


Fig. 5. Simulation results using a backup diesel generator

As can be seen from Fig. 5, at time $t = 0.5$ s, when the battery charge level crosses the critical SoC mark of 20%, the system automatically turns on the diesel generator. The operating power of the 14 kW diesel generator corresponds to 70% of the rated power of the generator, which provides optimal specific energy consumption of fuel. The power of the diesel generator exceeds the current power of the consumer of 6.0 kW and its deficit of 2.4 kW, so most of the energy is directed to charging the batteries. This is reflected in the battery power graph, where the curve goes into the negative region with a value of -11.6 kW, which corresponds to an intense charge. From this point on, the battery

level (SoC) begins to skyrocket. This approach to the use of diesel generator energy allows you to speed up the process of charging the battery and increase the efficiency of using fuel energy, due to the operation of the generator in the optimal load mode.

The use of wind turbines also allows you to significantly save fuel, resources and operational costs associated with the operation of the diesel generator. Table 2 shows a comparison of the performance indicators of the studied power supply system when using a wind turbine in conjunction with a diesel generator.

Table 2. Comparison of operational indicators of power supply systems

Comparison Parameter	Diesel generator only (without wind turbines and batteries)	Hybrid system (diesel generator + wind turbine + battery)	Economic effect
Operating mode of the diesel generator	Constant (24 hours)	Intermittent (~ 5.5 hours/day)	-77% uptime
Average load on the diesel generator	≈ 6 kW (30% of nominal), inefficient	≈ 14 kW (70% of the nominal), optimally	+40% to engine efficiency
Daily wind generation	0 kWh	≈ 86 kWh	Environmentally friendly energy
Daily fuel consumption	~ 72.0 l	~ 25.0 l	$\sim 60.5\%$ (47.0 L)
Maintenance costs (um. units)	100%	23%	4.3x reduction

The total daily fuel consumption can be calculated when determining the schedule of changes in wind speed during the day (month, year) and is determined as follows:

$$Q = \int_0^{T_{DG}} (q_{DG} \cdot P_{DG}) \cdot dt \quad (6)$$

where: T_{DG} – is the operating time of the generator per day (hour), which in a hybrid system is calculated:

$$T_{DG} = \frac{E_l - E_w}{P_{DG} \cdot \eta_B} \quad (7)$$

where: q_{DG} – is the specific fuel consumption (l/kWh), which depends on the load; E_l and E_w are the daily energy consumption and generation from wind energy, respectively.

Analysis of the data in Table 2 shows that the main savings are achieved not only due to the direct replacement of fuel energy with wind energy, but also due to the displacement of the operating point of the diesel generator unit to the zone of maximum efficiency (70–80% of the rated power). In a DGT-only system, the generator operates at low power to cover an average load of ≈ 6 kW, which leads to overconsumption of fuel and accelerated engine coking. In a hybrid scheme, the diesel generator operates at a power of 14 kW, which allows you to charge the battery in a short time and ensure further operation of the system in silent mode.

Conclusions

As a result of this work, a comprehensive study of the operating modes of a hybrid autonomous power supply system was carried out, combining a wind power plant based on SGPM, a diesel generator and an energy storage system with a battery. The results of simulation modeling allow us to state the following:

The implementation of a UPS system with an MPPT controller allows you to optimize the power take-off from the wind turbine in a wide range of wind speeds $v = 4 \dots 10$ m/s.

The use of the combined mode, in which the diesel generator is used only when the battery discharge threshold is reached ($SoC < 20\%$), allows not only to meet the peak load of 20 kW but also to provide intensive battery charging. This reduces the overall operating time of the internal combustion engine and allows you to achieve fuel savings of 45–60% compared to continuous operation of the generator.

The use of LiFePO₄ batteries as an energy storage device effectively smooths out stochastic fluctuations in wind generation and provides an uninterrupted power supply to consumers. This significantly reduces the dynamic loads on the mechanical parts of the wind turbine and diesel generators, extending their life.

In addition to economic advantages, the proposed configuration significantly reduces the volume of harmful emissions of combustion products and the amount of used lubricant, making the system suitable for use in environmentally sensitive autonomous zones.

REFERENCES

1. Rekioua, D., Mokrani, Z., Kakouche, K. et al. Optimization and intelligent power management control for an autonomous hybrid wind turbine photovoltaic diesel generator with batteries. *Sci Rep* 13, 21830 (2023). <https://doi.org/10.1038/s41598-023-49067-4>.
2. Zoubir Roumila, Djamila Rekioua, Toufik Rekioua, Energy management based fuzzy logic controller of hybrid system wind/photovoltaic/diesel with storage battery, *International Journal of Hydrogen Energy*, Volume 42, Issue 30, 2017, Pages 19525-19535, ISSN 0360-3199, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.06.006>.
3. Saloua Belaid, Djamila Rekioua, Adel Oubelaid, Djamel Ziane, Toufik Rekioua, A power management control and optimization of a wind turbine with battery storage system, *Journal of Energy Storage*, Volume 45, 2022, 103613, ISSN 2352-152X, <https://doi.org/10.1016/j.est.2021.103613>.
4. Maulik, A. and Das, D. (2019), Optimal power dispatch considering load and renewable generation uncertainties in an AC–DC hybrid microgrid. *IET Gener. Transm. Distrib.*, 13: 1164-1176. <https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2018.6502>.
5. X. Liu, P. Wang and P. C. Loh, "A Hybrid AC/DC Microgrid and Its Coordination Control," in *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 2, no. 2, pp. 278-286, June 2011, doi: 10.1109/TSG.2011.2116162.
6. Zoubir Roumila, Djamila Rekioua, Toufik Rekioua, Energy management based fuzzy logic controller of hybrid system wind/photovoltaic/diesel with storage battery, *International Journal of Hydrogen Energy*, Volume 42, Issue 30, 2017, Pages 19525-19535, ISSN 0360-3199, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.06.006>.
7. Khan, M. A., Zeb, K., Sathishkumar, P., Ali, M. U., Uddin, W., Hussain, S., Ishfaq, M., Khan, I., Cho, H.-G., & Kim, H.-J. (2018). A Novel Supercapacitor/Lithium-Ion Hybrid Energy System with a Fuzzy Logic-Controlled Fast Charging and Intelligent Energy Management System. *Electronics*, 7(5), 63. <https://doi.org/10.3390/electronics7050063>.
8. Aziz, A. S., Tajuddin, M. F. N., Adzman, M. R., Ramli, M. A. M., & Mekhilef, S. (2019). Energy Management and Optimization of a PV/Diesel/Battery Hybrid Energy System Using a Combined Dispatch Strategy. *Sustainability*, 11(3), 683. <https://doi.org/10.3390/su11030683>.
9. Chumack, V., Tsyvinskyi, S., Kovalenko, M., Ponomarev, A., Tkachuk, I. 2020. Mathematical modeling of a synchronous generator with combined excitation. *Eastern-European Journal of Enterprise*

- Technologies, 1, 5 (103) (Feb. 2020), 30–36. doi: 10.15587/1729-4061.2020.193495.
10. Holovko V. M., Kovalenko M. A., Kovalenko I. Ya., Halasun I. R. Matematychnе modeliuвання avtonomnoi vitroustanovky z synkhronnym heneratorom mahnitoelektrychnoho typu. Vidnovliu-valna enerhetyka, 2020, no.№ 4(63), S. 50–58. doi: 10.36296/1819-8058.2020.4(63).
 11. Yuan, H., Liu, J., Zhou, Y., & Pei, H. (2023). State of Charge Estimation of Lithium Battery Based on Integrated Kalman Filter Framework and Machine Learning Algorithm. *Energies*, 16(5), 2155. <https://doi.org/10.3390/en16052155>.
 12. Yimen, N., Tchotang, T., Kanmogne, A., Abdelkhalikh Idriss, I., Musa, B., Aliyu, A., Okonkwo, E. C., Abba, S. I., Tata, D., Mevaa, L., Hamandjoda, O., & Dagbasi, M. (2020). Optimal Sizing and Techno-Economic Analysis of Hybrid Renewable Energy Systems—A Case Study of a Photovoltaic/Wind/Battery/Diesel System in Fanisau, Northern Nigeria. *Processes*, 8(11), 1381. <https://doi.org/10.3390/pr8111381>.
 13. Ge Zhang, Yong Shi, Akbar Maleki, Marc A. Rosen, Optimal location and size of a grid-independent solar/hydrogen system for rural areas using an efficient heuristic approach, *Renewable Energy*, Volume 156, 2020, Pages 1203-1214, ISSN 0960-1481, <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.04.010>.
 14. Ge Zhang, Yong Shi, Akbar Maleki, Marc A. Rosen, Optimal location and size of a grid-independent solar/hydrogen system for rural areas using an efficient heuristic approach, *Renewable Energy*, Volume 156, 2020, Pages 1203-1214, ISSN 0960-1481, <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.04.010>.
 15. Barun K. Das, Majed A. Alotaibi, Pronob Das, M.S. Islam, Sajal K. Das, Md Alamgir Hossain, Feasibility and techno-economic analysis of stand-alone and grid-connected PV/Wind/Diesel/Batt hybrid energy system: A case study, *Energy Strategy Reviews*, Volume 37, 2021, 100673, ISSN 2211-467X, <https://doi.org/10.1016/j.esr.2021.100673>.
 16. Kovalenko, M. A., Reutsky, M. O., Kovalenko, I. Ya., Bazarov, O. O., & Titov, Ye. O. (2025). Vy-korystannia dzhherela bezperebiinoho zhyvlennia dlia znyzhennia ekspluatatsiinykh vytrat avtonom-noho elektroheneratora. *Vidnovliuvana enerhetyka*, 1(80), 29-37. [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2025.1\(80\).29-37](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2025.1(80).29-37).
 17. Katsadze, T., Chyzhevskiy, V., Kovalenko, M., Chumack, V., & Buslova, N. (2025). Normalization of non-sinusoidality indicators of magnetoelectric generator under an autonomous mode of operation. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3(8 (135)), 34–41. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2025.332187>.
 18. Djaafar Toumi, Djiliani Benattous, Ahmed Ibrahim, H.I. Abdul-Ghaffar, Sergey Obukhov, Raef Aboelsaud, Yacine Labbi, Ahmed A. Zaki Diab, Optimal design and analysis of DC–DC converter with maximum power controller for stand-alone PV system, *Energy Reports*, Volume 7, 2021, Pages 4951-4960, ISSN 2352-4847, <https://doi.org/10.1016/j.egy.2021.07.040>.
 19. Hanane Hassani, Faika Zaouche, Djamila Rekioua, Saloua Belaid, Toufik Rekioua, Seddik Bacha, Feasibility of a standalone photovoltaic/battery system with hydrogen production, *Journal of Energy Storage*, Volume 31, 2020, 101644, ISSN 2352-152X, <https://doi.org/10.1016/j.est.2020.101644>.
 20. Tiewei Song, Lijun Fu, Linlin Zhong, Yaxiang Fan, Qianyi Shang, HP3O algorithm-based all electric ship energy management strategy integrating demand-side adjustment, *Energy*, Volume 295, 2024, 130968, ISSN 0360-5442, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.130968>.
 21. Mohammadamin Shirkhani, Jafar Tavoosi, Saeed Danyali, Amirhossein Khosravi Sarvenoe, Ali Abdali, Ardashir Mohammadzadeh, Chunwei Zhang, A review on microgrid decentralized energy/voltage control structures and methods, *Energy Reports*, Volume 10, 2023, Pages 368-380, ISSN 2352-4847, <https://doi.org/10.1016/j.egy.2023.06.022>.