

Олійніченко Максим Юрійович, аспірант кафедри Електротехніки, +38(098)458-20-12, oliynichenko@kdu.edu.ua, ORCID ID: 0000-0001-6651-0175

*Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського
вул. Університетська, 20, м. Кременчук, 39600*

Бялобржеський Олексій Володимирович, к.т.н., доцент, кафедра електротехніки, +38(066)-719-72-98, bialobrzieski@ukr.net, ORCID ID: 0000-0003-1669-4580

*Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського
вул. Першотравнева, 20, м. Кременчук, 39600*

Постіл Артур Олегович, аспірант кафедри Електротехніки, +38(067)188-55-99, artur_postil@kdu.edu.ua, ORCID ID: 0000-0001-9411-7047

*Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського
вул. Університетська, 20, м. Кременчук, 39600*

Шокарьов Дмитро Анатолійович, к.т.н., доцент, кафедра електричних станцій, +38(096)596-98-55, dmytro.shokarov@khp.edu.ua, ORCID ID: 0000-0001-7038-3172

*Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»
вул. Кирпичова, 2, м. Харків, 61002*

МІКРОМЕРЕЖА З АЛЬТЕРНАТИВНИМИ ДЖЕРЕЛАМИ ЕНЕРГІЇ ДЛЯ ПОТРЕБ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ ПІДПРИЄМСТВ

***Анотація.** Питання розвитку альтернативних джерел енергії є надзвичайно актуальним у контексті підвищення енергоефективності та енергетичної незалежності аграрних підприємств. З огляду на це, у статті проведено аналіз структур мікромереж, що базуються на відновлюваних джерелах енергії, таких як сонячні фотоелектричні модулі та вітрогенератори. Метою дослідження є розробка та обґрунтування гібридної структури мікромережі для енергозабезпечення сільськогосподарського об'єкта з урахуванням технічних та експлуатаційних факторів. У статті висвітлено особливості реалізації алгоритму MPPT у сонячних системах, який забезпечує роботу фотоелектричних панелей у точці максимальної потужності за допомогою підвищувального перетворювача. У вітрових установках розглянуто можливі варіанти реалізації керування залежно від типу генератора та системи навантаження. Для підвищення надійності живлення і забезпечення резерву до складу мікромережі введено акумуляторні батареї, що заряджаються через окремі керовані випрямлячі, а також інвертори для живлення змінного навантаження. У разі нестачі виробітку від основних відновлюваних-джерел енергії передбачається підключення дизельної генераторної установки. Запропонована гібридна структура мікромережі дозволяє забезпечити стабільне живлення споживачів при мінімізації експлуатаційних витрат та оптимальному розподілі навантажень між джерелами.*

***Ключові слова:** пристрій, структура, генератор, моніторинг, контроль*

Oliynichenko Maxim, PhD-student of Electical Engineering Department, +38(098)458-20-12, oliynichenko@kdu.edu.ua, ORCID ID: 0000-0001-6651-0175

*Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University
20, st. University, Kremenchug, 39600*

Bialobrzheskyi Oleksii, Ph.D., Associate Professor, Electical Engineering Department, +38(067)188-55-99, artur_postil@kdu.edu.ua, ORCID ID: 0000-0001-9411-7047

Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University

20, st. University, Kremenchug, 39600

Postil Artur Olehovych, PhD-student of Electical Engineering Department, +38(067)188-55-99, artur_postil@kdu.edu.ua, ORCID ID: 0000-0001-9411-7047

Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University

20, st. University, Kremenchug, 39600

Shokarov Dmytro, Ph.D., Associate Professor, Department of Electric Power Stations, +38(096)596-98-55, dmytro.shokarov@khpi.edu.ua, ORCID ID: 0000-0001-7038-3172

National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute».

2, St. Kirpychova, Kharkiv, Ukraine, 61002.

A MICROGRID POWERED BY ALTERNATIVE ENERGY SOURCES FOR AGRICULTURAL ENTERPRISES

Abstract. *The development of alternative energy sources is highly relevant in the context of improving energy efficiency and ensuring energy independence for agricultural enterprises. In this regard, the paper presents an analysis of microgrid structures based on renewable energy sources such as photovoltaic solar modules and wind turbines. The aim of the study is to develop and justify a hybrid microgrid structure for the power supply of an agricultural facility, taking into account technical and operational factors. The paper outlines the implementation features of the MPPT algorithm in solar systems, which ensures that photovoltaic panels operate at their maximum power point through a boost converter. Various control strategies are considered for wind power systems, depending on the generator type and load configuration. To enhance power reliability and provide backup capacity, the microgrid incorporates battery energy storage systems charged via dedicated controlled rectifiers, as well as inverters for supplying alternating current loads. In case of insufficient energy generation from the main renewable sources, the integration of a diesel generator unit is proposed. The designed hybrid microgrid structure enables stable power supply to consumers while minimizing operational costs and ensuring optimal load distribution among energy sources.*

Keywords: *device, structure, generator, monitoring, control.*

Постановка проблеми. У сучасних умовах зростаючого попиту на надійне, стає та екологічно чисте енергопостачання особливого значення набувають мікромережі – автономні або напівавтономні енергетичні системи, здатні функціонувати як у складі центральної електричної мережі, так і незалежно від неї. Одним із найперспективніших напрямів розвитку таких систем є гібридні мікромережі, які поєднують у собі декілька джерел генерації енергії, зокрема відновлювані (сонячні, вітрові), традиційні (дизельні генератори), а також накопичувачі електроенергії [1, 2]. Гібридна структура дозволяє підвищити ефективність використання енергоресурсів, зменшити викиди шкідливих речовин та

забезпечити більшу стійкість до коливань у навантаженні або погодних умовах. Завдяки розподіленому характеру, мікромережі знижують залежність від централізованої інфраструктури та підвищують енергетичну безпеку, особливо у віддалених або критично важливих районах [3].

Особливу роль у гібридних мікромережах відіграють системи керування, які забезпечують балансування потужності, оптимізацію режимів роботи джерел, зниження втрат та покращення якості електроенергії. Важливим завданням є також інтеграція інверторів, перетворювачів та систем зберігання енергії в єдину, адаптивну до змін структуру..

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Мікромережа, що поєднує вітрові турбіни, системи зберігання енергії та інтелектуальні алгоритми диспетчеризації для оптимального балансування генерації та споживання пропонується в [4]. Така структура дозволяє зменшити залежність від традиційних джерел і підвищити ефективність використання відновлюваної енергії.

Авторами у [5] використовується мікромережа, що складається з дизель-генераторів, вітрової турбіни з індукційним генератором з подвійним живленням, з можливістю роботи як у підключеному до мережі, так і в автономному режимі. Основна увага приділяється впливу інтеграції вітрової енергії на втрати потужності та після аварійне відновлення напруги відповідно до стандартів IEEE 1547. Результати показують, що оптимальне розміщення вітрової турбіни та обмеження її проникнення на рівні 30 % забезпечують стабільну й ефективну роботу мікромереж. Представлено гібридну мікромережу для автономного енергозабезпечення сільських громад, що поєднує сонячну та вітрову енергетику. Система моделюється в MATLAB/Simulink і орієнтована на зниження залежності від викопного пального та покращення якості живлення.[6]. В даній роботі [7]. пропонується автономна гібридна мікромережа, що поєднує сонячну електростанцію, акумуляторну систему зберігання енергії та дизельний генератор для забезпечення безперервного енергопостачання. Система керується інверторами та оптимізується за допомогою

програмних засобів HOMER Pro, PVsyst і SAM з метою досягнення енергоефективності й економічної доцільності

У роботі [8] розглядається ізольована гібридна мікромережа для віддаленої спільноти, що поєднує сонячні панелі, акумуляторну систему зберігання енергії та дизельний генератор. Система оптимізується за допомогою математичної моделі, яка враховує метеодані, навантаження та вартісні обмеження для мінімізації загальних витрат. Така структура забезпечує гнучке та надійне енергопостачання без підключення до централізованої мережі.

Представлено структуру мікромережі, що поєднує сонячні панелі, вітрову турбіну, дизельний генератор і систему накопичення енергії, інтегровані через AC/DC шини та перетворювальні пристрої [9]. Така конфігурація дозволяє забезпечити безперервне електропостачання, балансування навантаження і резервування енергії. Керування потоками потужності здійснюється автоматично з урахуванням зміни навантаження, кліматичних умов і рівня заряду акумуляторів

Мета дослідження. Структуризація та узагальнення складових генераторних установок для подальшої побудови загальної структури мікромережі з альтернативними джерелами енергії для потреб сільськогосподарських підприємств.

Виклад основного матеріалу дослідження. В сучасних реаліях, де посилюються вимоги до безперебійного електропостачання, автоматизація, контроль та керування енерговиробництвом на агропідприємствах набувають особливого значення [10]. Птахофабрика є складною системою, яка потребує постійно електроенергію для забезпечення роботи життєво важливих функцій таких як: вентиляція, обігрів, освітлення, автоматична подача корму та води, збору яєць, а також функціонування санітарного обладнання. Тому будь-які перебої в електропостачанні можуть мати критичні наслідки, включаючи зниження продуктивності або навіть загибель поголів'я [11]. Саме тому все більше уваги приділяється впровадженню мікромереж – локальних енергосистем які можуть незалежно забезпечувати птахофабрику електроенергією, використовуючи

різноманітні джерела, такі як сонячні панелі, вітрогенераторні установки, дизельні генератори та системи збереження енергії [12].

Автоматизація в таких системах потрібна так як вона дає змогу точно координувати роботу генераторів, перемикатися між режимами живлення від центральної мережі та автономних джерел, контролювати рівень заряду систем збереження енергії, забезпечувати рівномірне навантаження на обладнання та запобігати перевантаженням. Автоматизовані системи дають можливість прогнозувати споживання електроенергії в залежності від денних і сезонних змін температури, віку птиці та етапів її вирощування. Такі системи також дозволяють ефективно розподіляти вироблену енергію між різними споживачами, оптимізуючи витрати та зменшуючи залежність від зовнішніх джерел електроенергії. Контроль є невіддільною складовою енергетичної безпеки птахофабрики. Постійний моніторинг робочих параметрів мікромережі, таких як напруга, струм, температура генераторів, рівень палива, швидкість вітру дозволяє вчасно виявляти відхилення та запобігати аварійним ситуаціям [13]. Це особливо важливо в умовах, коли птахофабрика працює у режимі 24/7, без можливості простою. Автоматизовані системи збору та обробки даних можуть фіксувати навіть незначні зміни в енергоспоживанні, сигналізуючи про можливі несправності

Система управління об'єднує всі складові мікромережі, а саме джерела генерації, накопичувачі, контролери, датчики та виконавчі механізми – в єдиний керований комплекс [14]. Це дозволяє підприємству не лише реагувати на поточні потреби, а й планувати розвиток енергосистеми з урахуванням змін у виробництві. Інтеграція таких систем з програмним забезпеченням забезпечує централізоване керування процесами, накопичення статистики, аналіз ефективності роботи обладнання та прийняття обґрунтованих управлінських рішень.

Визначимо функціональну структуру пристроїв використовуваних для керування потоками електричної енергії альтернативних джерел та взаємозв'язок

цих пристроїв в системі електропостачання малого підприємства сільсько-господарської галузі [15, 16].

У сонячних електростанціях такі пристрої є критично важливими елементами, без яких вироблена сонячними панелями енергія не може бути використана ні споживачами, ні подана в електромережу. Вони виконують перетворення, стабілізацію, та контроль потоку електроенергії, отриманої з фотоелектричних модулів. Аналіз різноманіття таких пристроїв дозволяє узагальнити їх внутрішню структуру. Розглянемо її на прикладі пристрою ACRUX-120K-L є безтрансформаторним трифазним перетворюючим пристроєм для фотоелектричних систем. Він розрахований на роботу з максимальною вихідною потужністю до 120 кВт при температурі навколишнього середовища 25°C. У разі підвищення температури до 40°C його номінальна потужність зменшується до 110 кВт, а при 50°C – до 100 кВт. Це викликано характеристиками сонячних панелей, які втрачають потужність в залежності від рівня підвищення температури. З боку постійного струму пристрій здатен приймати напругу до 1100 В, а діапазон робочої напруги в режимі стеження за точкою максимальної потужності (MPPT) становить від 200 до 1000 В. Пристрій має десять MPPT-контролерів, кожен з яких підтримує два незалежні входи постійного струму від відповідних зборок сонячних панелей. Максимальний вхідний струм на один MPPT-контролер становить 26 А. Пристрій здатен витримати струм короткого замикання у 40 А.

На стороні змінного струму пристрій підтримує підключення до мережі з номінальною напругою 0,4 кВ, з можливістю налаштування конфігурації підключення як 3W+PE (трифазне із заземленням за замовчуванням), так і 3W+N+PE (трифазне із заземленням та нейтральним виводом). Діапазон робочої напруги з боку змінного струму при паралельній роботі з мережею становить від 320 до 480 В, а робоча частота може варіюватись у межах 45–55 або 55–65 Гц з номінальним значенням 50/60 Гц. Номінальний вихідний струм дорівнює 158,8 А, а максимальний – 176,4 А. Коефіцієнт потужності підтримується не нижче 0,8. Рівень гармонік

вихідного струму (THDI) становить менше 3 %. Коефіцієнт корисної дії інвертора, який входить до складу пристрою сягає 98,7 % у піковому режимі. Ефективність функціонування MPPT досягає 99,9 %, що гарантує максимально точне стеження за робочою точкою сонячних модулів.

Захист пристрою включає в себе системи запобігання роботі в острівному режимі (anti-islanding), тобто пристрій розрахований лише на паралельну роботу з мережею. Захист від зворотної полярності постійного струму унеможливорює коротке замикання за умов невірної полярності при підключенні, короткого замикання на стороні змінного струму, струмів витоку та перенапруги. Крім того, в пристрій вбудована система моніторингу стану мережі та самодіагностики.

Комунікаційні можливості пристрою реалізовані через інтерфейси RS485 і Bluetooth, з можливістю підключення Wi-Fi, GPRS або PLC-модуля. Для локального керування використовується панель індикації зі світлодіодами та мобільний додаток.

Таким чином, структурна схема пристрою може бути зображена так, як наведено на рис. 1.

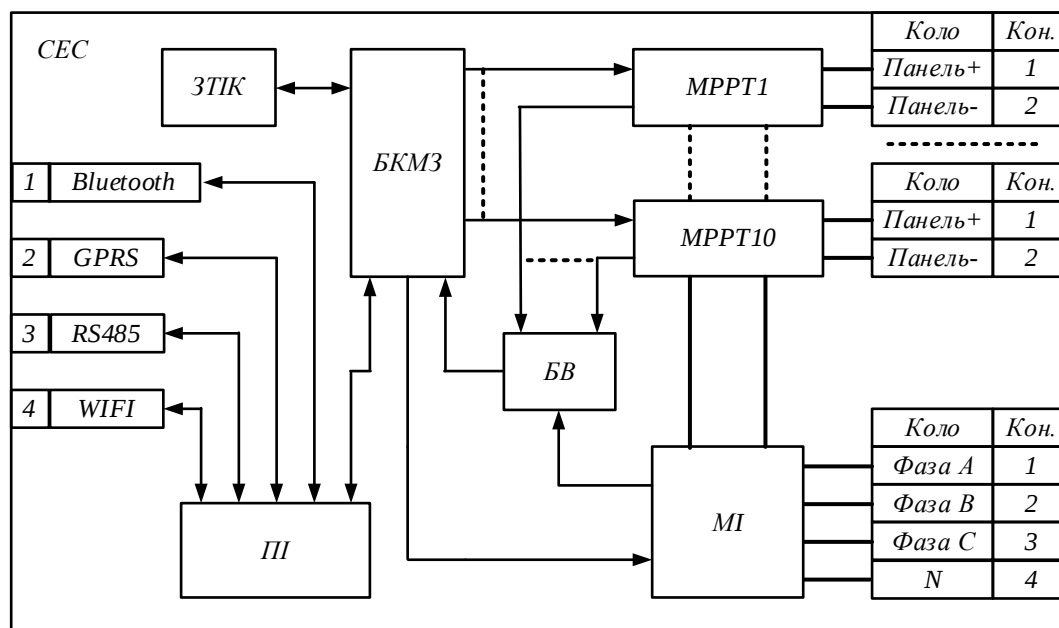


Рисунок 1 – Структурна схема пристрою сонячної електростанції

Схема складається з восьми блоків для підключення зовнішніх кіл. Групи датчиків струму та/або напруги на схемі не наведені. Групи клем для підключення

фотоелектричних панелей (Панель+, Панель-), група клем підключення фаз мережі (Фаза) та нейтралі (N). Група клем Панель з'єднанні з блоками MPPT-контролерів (MPPT1-MPPT10) Група клем мережі з'єднанні з мережевим інвертором (МІ). Виходи зазначених блоків з'єднанні з блоком вимірювання (БВ). Сигнали з БВ надходять на блок контролю моніторингу та захисту (БКМЗ). блок забезпечує керування MPPT-контроллерами та МІ. Спостереження за параметрами режиму та певні операції керування можуть бути реалізовані оператором з використанням зовнішнього терміналу індикації та контролю (ЗТІК). Також БКМЗ має двосторонній зв'язок з перетворювачем інтерфейсів (ПІ), який має двосторонні зв'язки з інтерфейсами підключення: – дротова передача даних «вита пара» (RS485); передача даних з використанням радіозв'язку. (GPRS); радіо передача даних на невелику відстань (Bluetooth); бездротова локальна мережа (Wi-Fi). В результаті такий пристрій може бути досить легко інтегрованим в локальну інформаційну мережу.).

Прийнявши до уваги перелічені функції пристрою та його характеристики зважаючи на невелику відстань між об'єктами на території підприємства [15], а також зважаючи на додаткову вартість опціональних інтерфейсів, будемо використовувати для інформаційного зв'язку в мікромережі інтерфейс RS485.

У вітроенергетичних установках пристрої перетворення є критично важливими компонентами, без яких енергія, вироблена вітротурбіною, не може бути ефективно використана ані споживачами, ані передана до електричної мережі. Вони забезпечують перетворення параметрів змінного струму, отриманого з генератора, стабілізацію частоти та напруги, а також контроль напрямку та обсягів потоку енергії. Аналіз конструктивного та функціонального різноманіття цих пристроїв дозволяє узагальнити їх типову структуру й принципи побудови в складі вітроенергетичних систем. Розглянемо на прикладі пристрою FKJ-GT60KW. Він є спеціалізованим пристроєм для управління вітровими турбінами потужністю до 60 кВт, який забезпечує перетворення, контроль і моніторинг електроенергії, отриманої від вітрогенератора, а також захист системи від пошкоджень. Він

підтримує роботу як у мережевих, так і в автономних системах, і може працювати з трифазним змінним струмом напругою 380–400 В. Основна його функція – випрямлення змінного струму генератора до постійного струму напругою понад 520 В та подальша подача цієї енергії до навантаження у разі наявності такого навантаження, що живиться від постійного струму або до інвертору.

Контролер підтримує сучасні засоби зв'язку – RS485, USB, GPRS, Wi-Fi, Ethernet, а також протокол Modbus, що дозволяє інтегрувати пристрій у системи диспетчеризації або реалізовувати віддалений моніторинг.

Виходячи з опису пристрою структурна схема може бути зображена як на рис. 2. Схема складається з семи груп блоків для підключення зовнішніх кіл. Групи датчиків струму та/або напруги як і в випадку з пристроєм сонячної електростанції на схемі не наведені. Групи клем для підключення обмотки генератора до пристрою збудження (ПЗ+, ПЗ-) група клем підключення фаз генератора (Фаза А, Фаза В, Фаза С) група клем підключення фаз мережі (фаза а, фаза б, фаза с) та нейтралі (N). Група клем ПЗ з'єднанні з пристроєм збудження (ПЗ) Група клем генератора підключена до керованого випрямляча (КВ). виходи КВ з'єднанні з пристроєм збудженням та мережевим інвертором (МІ). Група клем мережі з'єднанні з мережевим інвертором. Виходи зазначених блоків з'єднані з блоком вимірювання (БВ). Сигнали з БВ надходять на блок контролю моніторингу та захисту (БКМЗ). блок забезпечує керування ПЗ, КВ та МІ. Спостереження за параметрами режиму та певні операції керування можуть бути реалізовані оператором з використанням зовнішнього терміналу індикації та контролю (ЗТІК). БКМЗ також обмінюється даними з перетворювачем інтерфейсів (ПІ), який, у свою чергу, забезпечує зв'язок з різними інтерфейсами підключення. Серед них: дротове з'єднання за допомогою «витой пари» (RS485), передача даних через радіозв'язок (GPRS), бездротова локальна мережа (Wi-Fi), мережеву технологію Ethernet через SFP модуль з підтримкою Modbus TCP. Завдяки переліченим варіантам з'єднання з іншими пристроями або центром керування даний пристрій може бути інтегрованим в мікромережу.

Враховуючи функціональні можливості пристрою, його технічні характеристики, також як і в випадку з пристроєм сонячної електростанції підприємство має невелику відстань між об'єктами та не передбачається необхідність застосовувати всі опціональні інтерфейси, тому для організації інформаційного обміну в мікромережі було вирішено використовувати інтерфейс RS485.

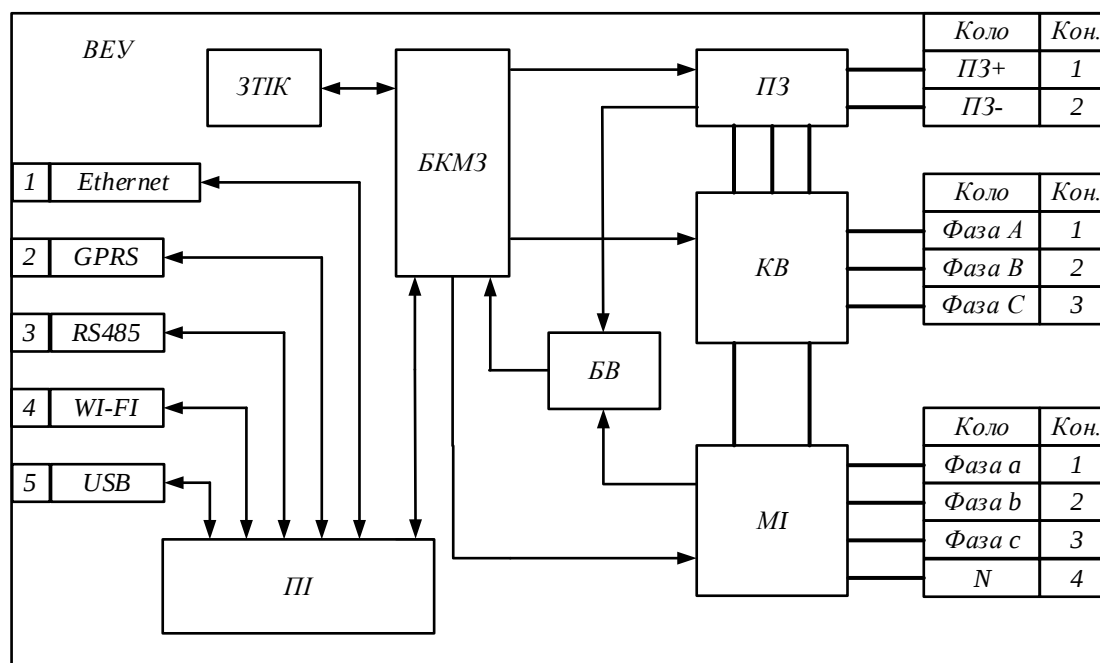


Рисунок 2 – Структурна схема пристрою вітроенергетичної установки

У системах автономного або резервного енергопостачання дизельні генераторні установки є ключовими елементами, здатними забезпечити безперервну подачу електроенергії у разі дефіциту генерованої потужності відновлюваних джерел або відсутності мережевого живлення. Вони здійснюють генерацію електроенергії зі стабільними параметрами напруги та частоти, адаптуючись до змін навантаження за допомогою систем автоматичного регулювання. Аналіз конструкції та функціонування дизельних генераторів дає змогу виокремити типові структурні компоненти, необхідні для їх інтеграції в гібридні мікромережі та забезпечення енергонезалежності споживачів. Розглянемо дизель-генераторну установку на прикладі TMGB-275. Установка оснащена дизельним двигуном BAUDOUIN

6M11G275/5, шестициліндровим, рядного типу, з об'ємом 9,7 літра, турбонаддувом і охолодженням після наддуву з частотою обертання двигуна становить 1500 об/хв. Двигун має електронну систему регулювання, пряме впорскування палива та рідинне охолодження. Ступінь стиснення становить 17:1. Дизельний двигун оснащений системою запуску напругою 24 В, та акумулятором з двома батареями ємністю 72 А·год.

Генератор забезпечує резервну потужність 275 кВА (220 кВт) та основну потужність 250 кВА (200 кВт). Генераторна установка передбачає можливість встановлення синхронізуючої системи яка додатково постачається виробником. Генераторна частина – це синхронна, безщіткова, самозбуджувальна синхронна машина з 4 полюсами та трифазним виходом з типом з'єднання – зірка. З вихідною номінальною напругою 230/400 В та стабілізується за допомогою регулятора AVR SX460 із точністю $\pm 0,5\%$. Робоча частота 50 Гц. Коефіцієнт потужності 0,8. Рівень гармонік вихідного струму (THDi) становить менше 3 %.

Комунікаційні можливості дизельного генератора реалізовано через пристрій Datakom D-300, який підтримує інтерфейси RS232, з можливістю підключення GPRS або USB. Для локального керування використовується панель індикації.

Таким чином, структурна схема пристрою може бути зображена так, як наведено на рис. 3. Схема складається з шести груп блоків для підключення зовнішніх кіл. Групи датчиків струму та/або напруги на схемі не наведені як і в пристрої вітрогенераторної установки та пристрою сонячної електростанції. Групи клем для підключення пристрою збудження (ПЗ+, ПЗ-) група клем підключення фаз синхронного генератора (Фаза А, Фаза В, Фаза С) та нейтралі (N) та група клем для підключення фаз мережі (Фаза а, Фаза б, Фаза с). Група клем ПЗ з'єднанні з пристроєм збудження (ПЗ). Група клем фаз синхронного генератора та група клем фаз мережі з'єднано з блоком датчиків (БД). Вихід блоку датчиків з'єднано з блоком вимірювання (БВ). Сигнали з БВ надходять на блок контролю моніторингу та захисту (БКМЗ) блок забезпечує керування ПЗ а також забезпечується керування та

моніторинг з блоку подачі палива на дизельний двигун (БПДД) через інтерфейс підключення CAN з стандартом SAE J1939, та спостереження за параметрами режиму та певні операції керування можуть бути реалізовані оператором з використанням зовнішнього терміналу індикації та контролю (ЗТІК). Пристрій має можливість передачі даних до інших пристроїв через перетворювач інтерфейсів (ПІ) що має двосторонній зв'язок з БКМЗ та є можливість підключити чотири інтерфейси з двосторонніми зв'язками: дротова передача даних «вита пара» (RS232); передача даних з використанням радіозв'язку. (GPRS); та універсальна послідовна шина (USB). Ці інтерфейси забезпечують стабільне підключення пристрою до мікромережі.

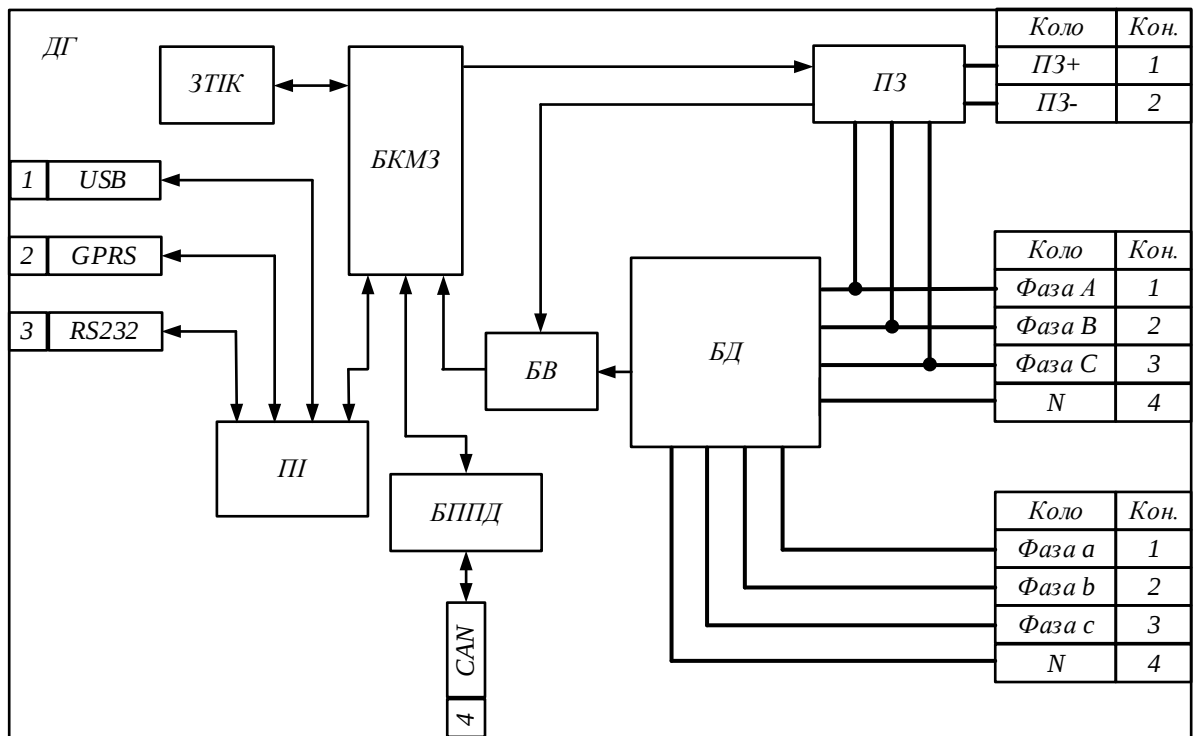


Рисунок 3 – Структурна схема пристрою дизельного генератора

Для забезпечення інтеграції пристрою дизельного генератора в мікромережу з урахуванням перелічених функцій та дистанції між об'єктами доцільно застосувати для інформаційного зв'язку інтерфейс RS232.

Системи збереження енергії відіграють ключову роль у сучасних енергетичних мережах, забезпечуючи баланс між генерацією та споживанням електроенергії. Їх

основна функція полягає в акумулюванні надлишкової енергії у періоди низького навантаження або високого виробітку та її подальшому вивільненні у моменти пікового споживання або нестачі генерації. Завдяки цьому системи збереження енергії підвищують гнучкість і надійність енергосистеми, сприяють стабілізації напруги та частоти в мережі, забезпечують резервне живлення для критично важливих об'єктів і зменшують залежність від традиційних джерел енергії. Окрім того, вони дозволяють ефективніше інтегрувати децентралізовані та відновлювані джерела в енергетичну інфраструктуру.

У якості прикладу пристрою системи збереження енергії розглянемо пристрій Huawei LUNA2000-215-2S12 – це інтелектуальна система зберігання енергії. Система забезпечує зберігання та віддачу енергії до 215 кВт·год із повним діапазоном заряджання і розряджання – від 0 до 100 %, при максимальній швидкості циклів 0,5 СР, який вказує на відношення струму заряду/розряду до ємності акумулятора, в даному випадку батарея віддає 50 % своєї ємності за годину, а також заряджає 50 % ємності батареї за годину. Також ефективність циклічного перетворення складає до 91,3 %. В основі системи використовуються літій-залізо-фосфатні акумуляторні батареї, з конфігурацією 240S1P (4 батарейні модулі по 60 елементів кожен), кожен з яких має номінальну ємність 53,8 кВт·год, робочу напругу в діапазоні 162–216 В. Загальна робоча напруга системи становить від 648 до 864 В, а номінальний постійний струм – 140 А.

Система інтегрує інвертор моделі PCS2000-108K-MB1 із номінальною потужністю 108 кВт який здатний перетворювати постійну напругу від батарей у змінну напругу 380/400/415 В, з робочою частотою мережі 50 або 60 Гц і навпаки. Максимальна ефективність заряджання PCS становить 98,6 %, а розряджання – 98,7 %. Коефіцієнт потужності регулюється в діапазоні від -1 до 1. Рівень гармонік вихідного струму (THDi) становить менше 1,5 %.

Система підтримує функції захисту, включаючи антиострівну роботу пристрою, що перешкоджає генерацію потужності в мережу без наявного споживача,

виявлення залишкового струму, контроль опору ізоляції, захист від перевантаження та короткого замикання.

Для комунікації використовується інтерфейс Ethernet (вита пара) через роз'єм RJ45 для малих дистанцій або оптоволокно через SC конектор для підключення на великі дистанції. Система оснащена модулем керування, що відповідає за моніторинг та обробку даних. Вбудовані індикатори стану (статусу, заряду, тривоги) дозволяють оперативно відслідковувати стан системи.

На основі перелічених функціональних можливостей, а також внутрішніх складових пристрою систем збереження енергії структурну схему можливо зобразити на рис. 4.

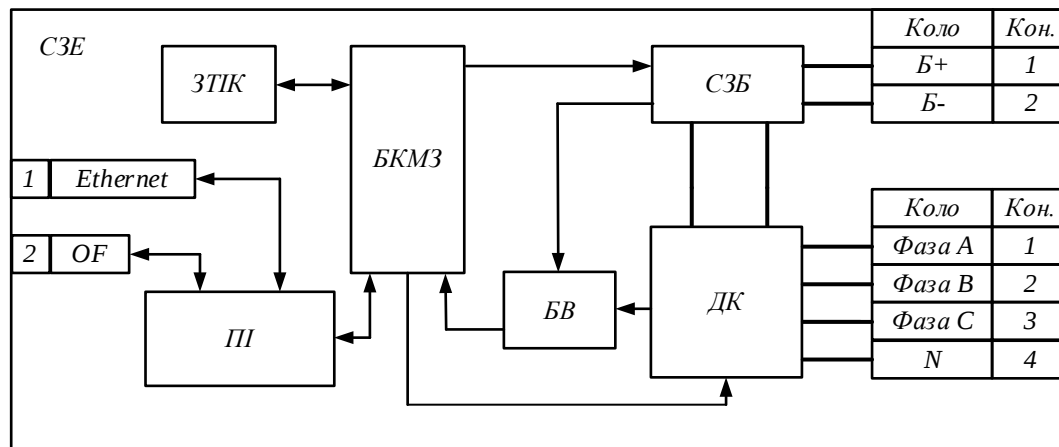


Рисунок 4 – Структурна схема пристрою систем збереження енергії

Схема складається з шести груп блоків для підключення зовнішніх кіл. Групи датчиків струму та/або напруги на схемі не наведені як в і в попередніх пристроях. Групи клем для підключення батареї (Б+, Б-), група клем підключення фаз мережі (Фаза А, Фаза В, Фаза С) та нейтралі (N). Група клем батареї з'єднано з пристроєм виміру стану заряду батареї (СЗБ). Група клем мережі з'єднанні з двонаправленим конвертором (ДК). Виходи зазначених блоків з'єднані з блоком вимірювання (БВ). Сигнали з БВ надходять на блок контролю моніторингу та захисту (БКМЗ). блок забезпечує станом заряду та ДК. Спостереження за параметрами режиму та певні операції керування можуть бути реалізовані оператором з використанням

зовнішнього терміналу індикації та контролю (ЗТІК). Також БКМЗ має двосторонній зв'язок з перетворювачем інтерфейсів (ПІ), який має двосторонні зв'язки з інтерфейсами підключення Ethernet (вита пара) з та оптоволоконної локальної мережі (OF).

Після аналізу наявних параметрів пристрою та виходячи зі специфікації об'єкту підприємства прийнято рішення використання інтерфейсу підключення Ethernet.

Для моніторингу рівня якості електроенергії в мікромережі потрібно застосовувати спеціалізований прилад з необхідним набором функціональних можливостей. Одним з таких приладів є пристрій SATEC PM175, на його основі можна скласти типову структурну схему для подібних приладів. Пристрій PM175 є багатофункціональним трифазним вимірювальним приладом та аналізатором якості електричної енергії змінного струму. Прилад має три входи напруги та три входи струму з гальванічною ізоляцією, які можуть підключатися як безпосередньо, так і через трансформатори. Пристрій аналізує напругу, струм, частоту та розраховує активну, реактивну та повну потужність, коефіцієнт потужності, струм нейтралі, а також несиметрію параметрів у мережі. Також він підтримує детальний аналіз гармонічних складових до 50-го порядку з визначенням коефіцієнта спотворення синусоїди, коефіцієнта спотворення струму, коефіцієнту гармонічних втрат струму.

Пристрій має два порти зв'язку з підтримкою інтерфейсів RS-232/422/485, Ethernet, модема або Profibus, і може використовуватись як у локальних, так і в дистанційних системах моніторингу. Він підтримує протоколи Modbus RTU/ASCII/TCP, DNP3, Profibus DP.

Таким чином, структурна схема пристрою може бути зображена так, як наведено на рис. 5. Схема складається з восьми груп блоків для підключення зовнішніх кіл. Групи датчиків струму та/або напруги на схемі не наведені по аналогії з попередніми пристроями. Група клем підключення фаз мережі (Фаза А, Фаза В, Фаза С) та нейтралі (N). Група клем підключення виходу фаз мережі (Фаза а, Фаза б, Фаза с) та нейтралі (N). Клеми зазначених блоків з'єднані з блоком вимірювання

(БВ). Спостереження за параметрами мережі може відбуватися з використанням зовнішнього терміналу індикації (ЗТІ). Також БВ має зв'язок з перетворювачем інтерфейсів (ПІ), який має виходи до інтерфейсів підключення: дротова передача даних «вита пара» (RS485, RS422, RS232); локальна провідна мережа (Ethernet) та стандарт польової шини Profibus. В результаті такий пристрій може бути швидко інтегрованим в локальну інформаційну мережу.

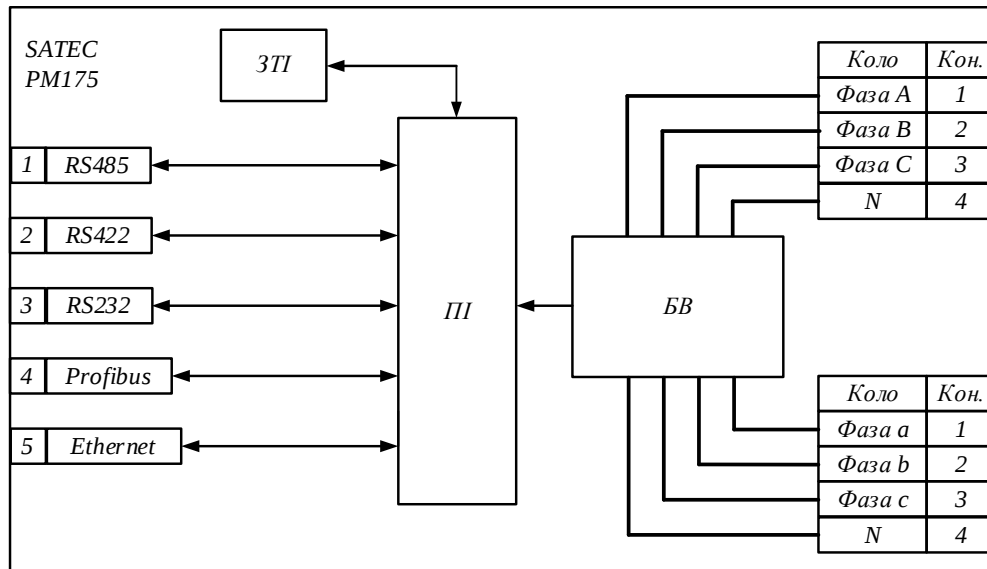


Рисунок 5 – Структурна схема пристрою аналізу якості електроенергії

Прийнявши до уваги перелічені функції пристрою та його характеристики і також зважаючи на невелику відстань між об'єктами на території підприємства, прийнявши до уваги додаткову вартість опціональних інтерфейсів, будемо використовувати для інформаційного зв'язку в мікромережі інтерфейс RS485.

Узагальнюючи отримані структури пристроїв можливо скласти загальну структуру мікромережі на базі системи електропостачання птахофабрики. Представлена структура на рис 6. відображає інтегровану мікромережу, до складу якої входять різні джерела електроенергії, система збереження енергії, вимірювальні прилади та засоби централізованого моніторингу й керування. Основними джерелами генерації є дизельний генератор TMGB-275 та вітрогенератор BEV FKJ-GT60KW. Дизельний генератор має два інтерфейси зв'язку: CAN, через який здійснюється

взаємодія з датчиком дизельного пального (ДД), і RS-232, через який він передає дані до центру збору інформації. Вітрогенератор підключено до тієї ж системи за допомогою інтерфейсу RS-485.

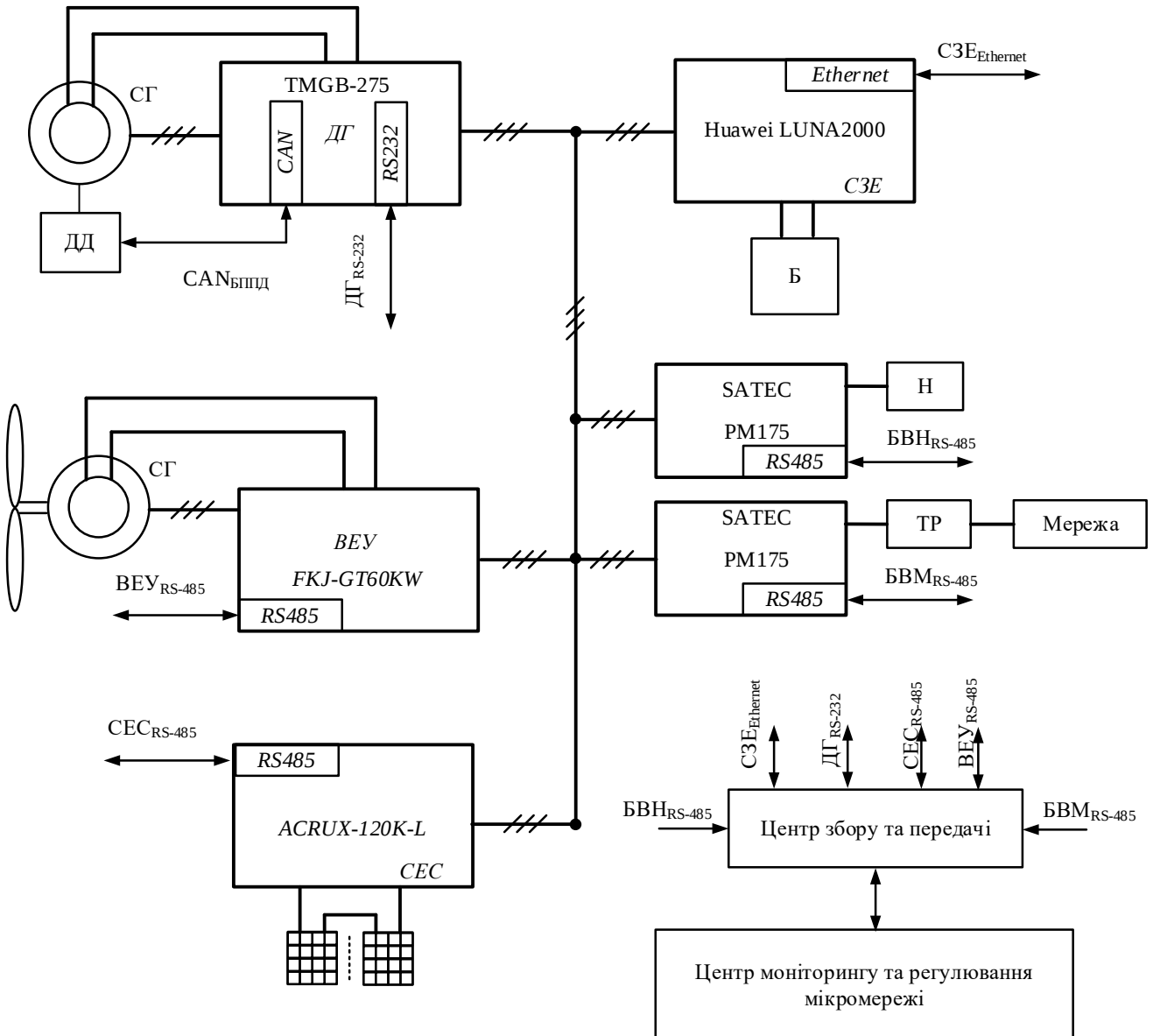


Рисунок 6 – Мікромережа системи електропостачання птахофабрики

До мікромережі також підключена система збереження енергії Huawei LUNA2000. Вона має Ethernet-зв'язок для передачі даних та взаємодії з іншими компонентами мікромережі. У структурі присутні два багатофункціональні енергомонітори SATEC PM175, які встановлені відповідно на лінії живлення

навантаження та на виході трансформатора розподілу, що підключений до зовнішньої мережі. Ці прилади також використовують інтерфейс RS485 для зв'язку з центром збору даних.

Центральною ланкою системи є центр збору та передачі інформації, до якого надходять дані з усіх джерел генерації потужності – дизельного генератора (через RS232), вітрогенератора, (через RS485) системи збереження енергії (через Ethernet) та сонячної електростанції (через RS485). А також пристрою для моніторингу параметрів мікромережі (через RS485) та пристрою для моніторингу параметрів зовнішньої мікромережі (RS485) Далі ці дані передаються до центру моніторингу та регулювання мікромережі, який виконує функції аналізу, обробки інформації та прийняття рішень щодо керування режимами роботи мікромережі.

Мікромережа, що включає вітрогенераторну установку, сонячну електростанцію, систему збереження енергії та дизельний генератор, працює за принципом пріоритетного використання джерел енергії. У першу чергу використовується енергія з відновлюваних джерел – сонячної та вітрової, а надлишок генерованої енергії накопичується в системі збереження. У разі недостатньої генерації з ВГУ та СЕС для покриття навантаження, система використовує накопичену енергію з акумуляторів, а коли і цього бракує – автоматично запускається дизельний генератор, що забезпечує резервне живлення. Протягом доби контролер мікромережі постійно відстежує рівень споживання, виробітку та стан усіх джерел, керуючи їх взаємодією для підтримки балансу потужності, стабільної напруги та мінімізації витрат. Баланс реактивної потужності забезпечується перетворюючим пристроєм систем зберігання енергії або дизельним генератором.

Висновки з проведеного дослідження. У даній роботі проведено комплексне дослідження структури, принципу дії та алгоритму роботи гібридної мікромережі, яка об'єднує вітроенергетичну установку, сонячну електростанцію, дизель-генераторну установку, систему збереження енергії та пристрої контролю якості електроенергії. Запропоновано структурну схему електропостачання на базі птахофабрики з

врахуванням реальних пристроїв керування та передачі даних, таких як інтерфейси RS485, RS232 та Ethernet.

Встановлено, що певні виробники, для спрощення алгоритму керування установкою з альтернативними джерелами енергії, вводять функцію анти-острівного режиму, що певним чином ускладнює керування вищого рівня відповідними пристроями у разі відключення зовнішньої мережі.

Пропонована структура мікромережі здатна забезпечити пріоритетне використання відновлюваних джерел енергії, оптимальне балансування активної та реактивної потужності, резервне живлення від дизельного генератора та інтегровану систему моніторингу, що дозволяє підвищити ефективність та стабільність роботи мікромережі.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК:

1. P. Roy P., He J., Zhao T., Singh Y.V., Recent Advances of Wind-Solar Hybrid Renewable Energy Systems for Power Generation: A Review, *IEEE Open Journal of the Industrial Electronics Society*, 2022. 3. pp. 81–104. doi:10.1109/OJIES.2022.3144093.
2. Олійніченко М., Бялобржеський О., Постіл А., Шокарьов Д. Аналіз факторів використання електричних джерел енергії в мікромережах з позиції системи енергоменеджменту, *Енергозбереження. Енергетика. Енергоаудит*, 2024. 1(191). pp. 13–32. doi:10.20998/2313-8890.2024.01.02.
3. Mishra S., Viral R.K. Chapter 6 – Introduction to hybrid AC/DC microgrids', in Guerrero, J.M. and Kandari, R. (eds.) *Microgrids*, Academic Press, 2022. pp. 159–189. doi:10.1016/B978-0-323-85463-4.00005-8.
4. Wang Y., Wang Z., Sheng H. Optimizing wind turbine integration in microgrids through enhanced multi-control of energy storage and micro-resources for enhanced stability, *Journal of Cleaner Production*, 2024. 444. 140965. doi:10.1016/j.jclepro.2024.140965.
5. Aziz T., Salman S., Islam M.S., Razzaq A., Chowdhury R., Iqbal M., Mitun H. Integration of Wind Energy System in Microgrid Considering Static and Dynamic Issues, in *Proceedings of ICEEICT*, 2015. doi:10.1109/ICEEICT.2015.7307479.
6. Ali M., Riaz M., Koondhar M., Akram M.S., Guerrero J., Vasquez J., Khan B. Renewable energy sources-based hybrid microgrid system for off-grid electricity solution for rural communities, *Energy Science & Engineering*, 2023. 11. doi:10.1002/ese3.1535.
7. Bhatti M.Z.A., Siddique A., Aslam W., Atiq S. Design and Analysis of a Hybrid Stand-Alone Microgrid, *Energies*, 2024. 17(1). p. 200. doi:10.3390/en17010200.
8. Pesantes L.A. et al. Optimal Design of Hybrid Microgrid in Isolated Communities of Ecuador, *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, 2024. 12(2). pp. 488–499. doi:10.35833/MPCE.2023.000733.
9. Khamharnphol R., Kamdar I., Waewsak J., Chaichan W., Khunpetch S., Chiwamongkhonkarn S., Konruang C., Gagnon Y. Microgrid Hybrid Solar/Wind/Diesel and Battery Energy Storage Power

Generation System: Application to Koh Samui, Southern Thailand, *International Journal of Renewable Energy Development*, 2022. 12. pp. 216–226. doi:10.14710/ijred.2023.47761.

10. Khosravi M., Azarinfar H., Nejati S.A. Microgrids energy management in automated distribution networks by considering consumers' comfort index, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2022. 139. 108013. doi:10.1016/j.ijepes.2022.108013.

11. Boyko E., Byk F., Ilyushin P., Myshkina L., Suslov K. Methods to improve reliability and operational flexibility by integrating hybrid community mini-grids into power systems, *Energy Reports*, 2023. 9(Supplement 9). pp. 481–494. doi:10.1016/j.egyр.2023.06.038.

12. Li P., Liu Q. Optimizing energy management strategies for microgrids through chaotic local search and particle swarm optimization techniques, *Heliyon*, 2024. 10(17). doi:10.1016/j.heliyon.2024.e36669.

13. Sepasi S., Talichet C., Pramanik A.S. Power Quality in Microgrids: A Critical Review of Fundamentals, Standards, and Case Studies, *IEEE Access*, 2023. 11. pp. 108493–108531. doi:10.1109/ACCESS.2023.3321301.

14. Erdiwansyah E., Taleb A., Mahidin Husin H., Syafie N., Zaki M., Muhibbuddin M. A critical review of the integration of renewable energy sources with various technologies, *Protection and Control of Modern Power Systems*, 2021. 6. p. 3. doi:10.1186/s41601-021-00181-3.

15. Oliynichenko M., Bialobrzheskyi O., Postil A. Research on power distribution in a microgrid with distributed electricity sources, *Electrical Engineering and Power Engineering*, 2025. (1). pp. 42–52. doi:10.15588/1607-6761-2025-1-5.

16. D. Shokarov, V. Chorna, K. Bogodist. Economic feasibility study of expediency of establishment of solar modules in the private household. *Вісник НТУ «ХПІ». Серія: «Енергетика: надійність та енергоефективність»*. Харків : НТУ «ХПІ», 2017. Вип. № 31 (1253). С. 87–92
<https://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/33238>

REFERENCES:

1. P. Roy P., He J., Zhao T., Singh Y.V., Recent Advances of Wind-Solar Hybrid Renewable Energy Systems for Power Generation: A Review, *IEEE Open Journal of the Industrial Electronics Society*, 2022. 3. pp. 81–104. doi:10.1109/OJIES.2022.3144093.

2. Олійніченко М., Бялобржеський О., Постіл А., Шокарьов Д. Аналіз факторів використання електричних джерел енергії в мікромережах з позиції системи енергоменеджменту, *Енергозбереження. Енергетика. Енергоаудит*, 2024. 1(191). pp. 13–32. doi:10.20998/2313-8890.2024.01.02.

3. Mishra S., Viral R.K. Chapter 6 – Introduction to hybrid AC/DC microgrids', in Guerrero, J.M. and Kandari, R. (eds.) *Microgrids*, Academic Press, 2022. pp. 159–189. doi:10.1016/B978-0-323-85463-4.00005-8.

4. Wang Y., Wang Z., Sheng H. Optimizing wind turbine integration in microgrids through enhanced multi-control of energy storage and micro-resources for enhanced stability, *Journal of Cleaner Production*, 2024. 444. 140965. doi:10.1016/j.jclepro.2024.140965.

5. Aziz T., Salman S., Islam M.S., Razzaq A., Chowdhury R., Iqbal M., Mitun H. Integration of Wind Energy System in Microgrid Considering Static and Dynamic Issues, in *Proceedings of ICEEICT*, 2015. doi:10.1109/ICEEICT.2015.7307479.

6. Ali M., Riaz M., Koondhar M., Akram M.S., Guerrero J., Vasquez J., Khan B. Renewable energy sources-based hybrid microgrid system for off-grid electricity solution for rural communities, *Energy Science & Engineering*, 2023. 11. doi:10.1002/ese3.1535.

7. Bhatti M.Z.A., Siddique A., Aslam W., Atiq S. Design and Analysis of a Hybrid Stand-Alone Microgrid, *Energies*, 2024. 17(1). p. 200. doi:10.3390/en17010200.

8. Pesantes L.A. et al. Optimal Design of Hybrid Microgrid in Isolated Communities of Ecuador, *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, 2024. 12(2). pp. 488–499. doi:10.35833/MPCE.2023.000733.
9. Khamharnphol R., Kamdar I., Waewsak J., Chaichan W., Khunpetch S., Chiwamongkhonkarn S., Konruang C., Gagnon Y. Microgrid Hybrid Solar/Wind/Diesel and Battery Energy Storage Power Generation System: Application to Koh Samui, Southern Thailand, *International Journal of Renewable Energy Development*, 2022. 12. pp. 216–226. doi:10.14710/ijred.2023.47761.
10. Khosravi M., Azarinfar H., Nejati S.A. Microgrids energy management in automated distribution networks by considering consumers' comfort index, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2022. 139. 108013. doi:10.1016/j.ijepes.2022.108013.
11. Boyko E., Byk F., Ilyushin P., Myshkina L., Suslov K. Methods to improve reliability and operational flexibility by integrating hybrid community mini-grids into power systems, *Energy Reports*, 2023. 9(Supplement 9). pp. 481–494. doi:10.1016/j.egy.2023.06.038.
12. Li P., Liu Q. Optimizing energy management strategies for microgrids through chaotic local search and particle swarm optimization techniques, *Heliyon*, 2024. 10(17). doi:10.1016/j.heliyon.2024.e36669.
13. Sepasi S., Talichet C., Pramanik A.S. Power Quality in Microgrids: A Critical Review of Fundamentals, Standards, and Case Studies, *IEEE Access*, 2023. 11. pp. 108493–108531. doi:10.1109/ACCESS.2023.3321301.
14. Erdiwansyah E., Taleb A., Mahidin Husin H., Syafie N., Zaki M., Muhibbuddin M. A critical review of the integration of renewable energy sources with various technologies, *Protection and Control of Modern Power Systems*, 2021. 6. p. 3. doi:10.1186/s41601-021-00181-3.
15. Oliynichenko M., Bialobrzheskyi O., Postil A. Research on power distribution in a microgrid with distributed electricity sources, *Electrical Engineering and Power Engineering*, 2025. (1). pp. 42–52. doi:10.15588/1607-6761-2025-1-5.
16. D. Shokarov, V. Chorna, K. Bogodist. Economic feasibility study of expediency of establishment of solar modules in the private household. *Bulletin of NTU «KhPI». Series: «Energy: reliability and energy efficiency»*. Kharkiv: NTU «KhPI», 2017. Vol. No 31 (1253). P. 87–92 <https://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/33238>

Стаття надійшла до редакції: 18.07.2025; рецензування: 28.07.2025;

прийнята до публікації 02.08.2025. Автори прочитали и дали згоду рукопису.

The article was submitted on 18.07.2025; revised on 28.07.2025; and accepted for publication on 02.08.2025. The authors read and approved the final version of the manuscript.