

УДК 621.311.26: 621.311.18
DOI: 10.37128/2520-6168-2020-3-5

ПЕРСПЕКТИВИ ТА ПЕРЕДУМОВИ ВПРОВАДЖЕННЯ АВТОНОМНИХ СИСТЕМ ЕЛЕКТРОЗАБЕЗПЕЧЕННЯ АГРОПРОМИСЛОВИХ ПІДПРИЄМСТВ

Купчук Ігор Миколайович, к.т.н., доцент
Яропуд Віталій Миколайович, к.т.н., доцент
Телекало Наталія Валеріївна, к. с.-г. н., доцент
Вінницький національний аграрний університет
Граняк Валерій Федорович, к.т.н., доцент
Вінницький національний технічний університет

Ihor Kupchuk, PhD, Associate Professor
Vitaliy Yaropud, PhD, Associate Professor
Nataliia Telekalo, PhD, Associate Professor
Vinnytsia National Agrarian University
Valerii Hraniak, PhD, Associate Professor
Vinnytsia National Technical University

Агропромисловий комплекс є одним із основних та стабільних за обсягами надходжень до бюджету міжгалузевих формувань, в якому для здійснення виробничих процесів споживаються значні обсяги електроенергії, виробленої з використанням викопних, переважно імпортованих, паливних ресурсів, що створює загрозу для ефективного його функціонування та обумовлює актуальність проведення представлених в статті досліджень. Метою є оцінка потенціалу та визначення перспективних способів децентралізованого електрозабезпечення агропромислових товаровиробників на основі аналізу сучасних техніко-технологічних рішень в галузі електричної інженерії та синтезу перспективної схеми комбінованої системи автономного живлення сільськогосподарських підприємств.

В статті була здійснена оцінка технічних та технологічних можливостей для використання автономних електроустановок малими та середніми підприємствами аграрного сектору, що працюють на принципі конверсії відновлюваних джерел із урахуванням природно-кліматичного потенціалу Вінницької області. В результаті порівняльного аналізу експлуатаційних характеристик відомих способів накопичення електричної енергії було встановлено, що в умовах автономного електроживлення малих та середніх агропромислових підприємств за рахунок конверсії альтернативних джерел енергії, найбільш функціонально та економічно обґрунтованим варіантом є використання систем акумуляування енергії на базі маховиків з частковим використанням резервного блоку літій-іонних батарей.

Базуючись на вітчизняному та зарубіжному досвіді була запропонована перспективна схема комбінованої системи автономного живлення малих та середніх сільськогосподарських підприємств та сформувано пріоритетні напрями подальших досліджень для підвищення ефективності функціонування такої системи.

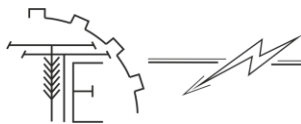
Дослідження техніко-технологічних передумов для розробки комбінованої системи автономного енергозабезпечення та її складових здійснювались із застосуванням методів аналізу, узагальнення та системного підходу. Потенційні переваги та ефект від впровадження запропонованої схеми ґрунтуються на основі законів розвитку технічних та електроенергетичних систем.

Ключові слова: електрозабезпечення агропромислових підприємств, автономна енергосистема, відновлювальні джерела енергії, система акумуляування енергії, маховик, комбіноване електроживлення.

Рис. 9. Літ. 16.

1. Вступ

В сучасних реаліях агропромисловий комплекс України виступає в ролі найбільш стійкої частини національної економіки та є одним із основних та стабільних за обсягами надходжень до



бюджету міжгалузевих формувань. Разом з тим виробництво та переробка продукції підприємств агробізнесу, як і решти галузей економіки АПК, характеризується значною енергоємністю, що за оцінками експертів [1], значно вища, ніж в інших промислово розвинених країнах та визначає Україну, як одну із найбільш енергетично неефективних країн у світі.

Практично все споживання енергії в Україні задовольняється за рахунок викопного палива, більша частина якого імпортується, в тому числі з РФ, що в сучасних реаліях агресивних дій східного сусіда, створює загрозу для енергетичної безпеки держави і зокрема стратегічно-важливої, бюджетотворюючої галузі – АПК.

Реагуючи на виклики сьогодення державними органами влади була розроблена та затверджена Указом Президента України від 26 травня 2015 року № 287/2015 «Стратегія національної безпеки» [2]. Відповідно до пункту 5 розділу 3 цієї стратегії визначені основні загрози щодо енергетичної безпеки:

- спотворення ринкових механізмів в енергетичному секторі;
- недостатній рівень диверсифікації джерел постачання енергоносіїв та технологій;
- криміналізація та корумпованість енергетичної сфери;
- недієва політика енергоефективності та енергозабезпечення.

В п.4.11 визначені пріоритетні напрямки забезпечення енергетичної безпеки України, серед яких диверсифікація джерел і маршрутів енергопостачання, подолання залежності від Росії у постачанні енергетичних ресурсів і технологій, розвиток відновлюваної та ядерної енергетики з урахуванням пріоритетності завдань екологічної, ядерної та радіаційної безпеки [2].

Окрім даного нормативно-правового акта, розпорядженням КМУ була схвалена «Енергетична стратегія України на період до 2035 року «Безпека, енергоефективність, конкурентоспроможність» [3], у рамках якої передбачається стаке розширення використання всіх видів відновлюваної енергетики з прогнозованим зростанням її частки у 2025 році до рівня 12 % від загального первинного постачання енергії та не менше 25 % – до 2035 року [3, 4]. Тому дослідження спрямовані розробку та модернізацію високоефективних систем автономного енергозабезпечення агропромислових підприємств, що базуються на використанні відновлювальних джерел енергії є **актуальними**, мають практичну цінність та стратегічну важливість у забезпеченні енергетичної безпеки України та ефективного функціонування економічної системи держави.

2. Аналіз останніх досліджень та публікацій

На даний час, найбільш широкого поширення в Україні набули системи автономного електропостачання на основі органічного палива, що складаються з двох основних частин: генератора і двигуна, який може бути бензиновим, дизельним або газовим. Проте повноцінне використання таких систем обмежується високою вартістю традиційних паливних ресурсів та робить економічно недоцільним повне заміщення ними централізованого електропостачання, що спонукає до розробки і створення систем автономного електропостачання на основі конверсії альтернативних джерел енергії [1, 5, 6].

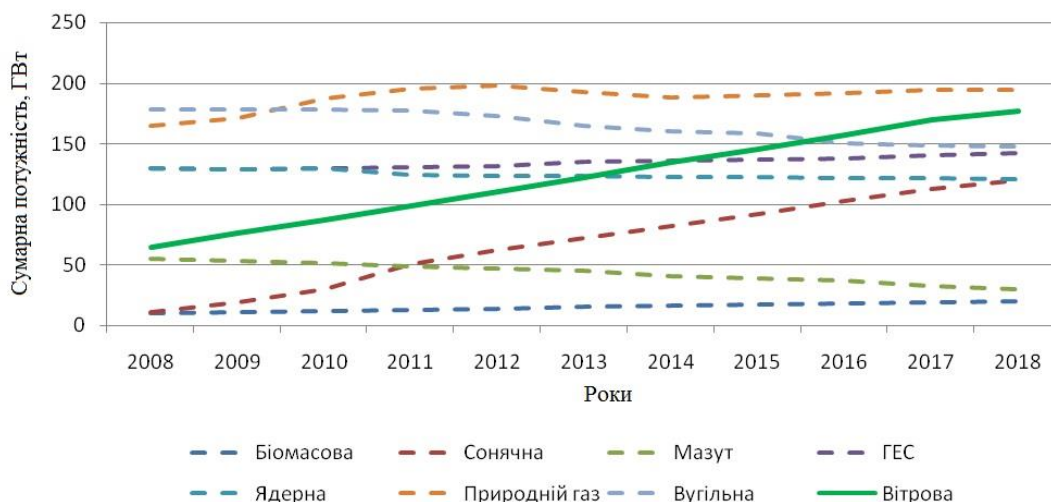
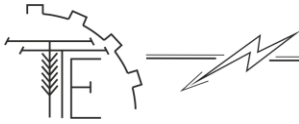


Рис. 1. Сумарна потужність електрогенерації в ЄС 2008-2018 рр.



Технічні та технологічні аспекти ефективного використання альтернативних джерел енергії відображено в працях багатьох науковців [1, 5, 6, 7], в яких крім переваг також відмічені проблеми, що виникають при освоєнні цих видів електроенергетики. Якщо ж виростання енергії сонця в системах енергозабезпечення і набуває все більшої популярності [1, 8], то потенціал вітрогенерації є невинуватено недооціненим та пояснюється такими факторами:

- непостійний характер та низька швидкість вітру на переважній частині території України, що створює складнощі для прогнозування графіка виробництва;
- потреба у використанні дорогих технічних засобів та обладнання для акумуляції виробленої електроенергії установками малої потужності.

Разом із тим, як позує досвід країн ЄС, на даний час галузь вітроенергетики є найбільш перспективною та такою, що характеризуються стрімкою динамікою нарощування об'ємів генерації для виробництва електроенергії (рис. 1) [9].

Ці світові тенденції змушують переглянути твердження, щодо недоцільності вітрової енергоконверсії для цілей АПК та сприяють активізації досліджень, які присвячені розробці високоефективних систем автономного енергозабезпечення агропромислових підприємств на основі альтернативних джерел енергії.

3. Мета та завдання дослідження

Таким чином, була сформульована мета досліджень, яка полягає в оцінці потенціалу та визначенні перспективних способів децентралізованого електрозабезпечення агропромислових товаровиробників на основі аналізу сучасних техніко-технологічних рішень в галузі електричної інженерії та синтезу перспективної схеми комбінованої системи автономного живлення сільськогосподарських підприємств.

4. Матеріали і методи

Оцінку техніко-технологічних можливостей та природно-кліматичного потенціалу Вінницького регіону для автономного живлення сільськогосподарських підприємств на принципі конверсії поновлювальних джерел енергії було здійснено враховуючи досвід вітчизняних [5, 6, 7] та зарубіжних вчених [10, 11] працюючих в цій галузі. Крім цього, була використана інформація представлена за результатами досліджень провідних міжнародних компаній [9, 12, 13] та Українського гідрометеорологічного центру [14].

Аналіз відомих технічних рішень та технологій накопичення електричної енергії отриманої від автономних електроустановок здійснювався із застосуванням методів узагальнення та системного підходу.

При розробці схеми комбінованої системи автономного енергозабезпечення – гіпотетико-дедуктивний метод. Потенційні переваги та ефект від впровадження запропонованої системи ґрунтуються на основі законів розвитку технічних та електроенергетичних систем [15].

5. Викладення основного матеріалу

Сьогодні фірмами-виробниками пропонуються різні конструкції вітрогенераторів з вертикальною віссю обертання, що дозволяють виробляти електричну енергію при швидкості вітру 1,0–1,5 м/с, при номінальному режимі роботи 3–4 м/с [5, 7, 10, 11].

Для оцінки потенційних можливостей вітрової електрогенерації для живлення сільськогосподарських споживачів було використано дані «Українського гідрометеорологічного центру» за 2019 рік (на прикладі Вінницької області) [14] та побудовано діаграми середніх та максимальних значень швидкості вітрового потоку по місяцях (рис. 2). Як видно з аналізу вітрової активності, на території Вінницької області впродовж року діють вітри, придатні для роботи вітроенергетичних установок. При цьому впродовж 10 місяців, за виключенням липня і серпня, можливе забезпечення їх роботи на номінальних експлуатаційних режимах.

Одним із відомих варіантів автономного електропостачання сільськогосподарських споживачів з використанням вітрової енергії є відома конструкція автономної системи електропостачання на основі вітроенергетичної установки з акумулятором і маховиком (рис. 3) [5].

За цією схемою крутний момент з валу вітроколеса 1 надходить на ротор асинхронного генератора 5 з закріпленим на ньому маховиком 2, що дозволяє в деякій мірі згладити зміни крутного моменту при поривах вітру і комутації навантаження. Енергія з генератора 5 надходить на інвертор-

комутатор 7, далі через зарядний пристрій 4 накопичується в акумуляторних батареях 3. У разі необхідності, при зменшенні швидкості вітру, для електропостачання споживачів 8 використовується енергія, накопичена в акумуляторних батареях 3. Керування роботою забезпечується автоматизованою системою управління 6 [6].

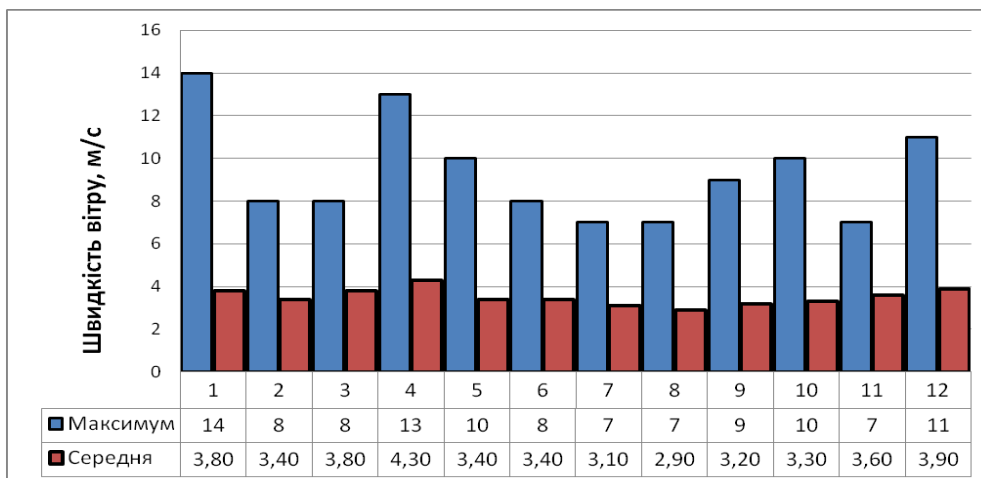


Рис. 2. Швидкість вітру по Вінницькій області в період 01.01.2019-31.12.2019

Також відома конструкція системи автономного електропостачання на основі гібридної вітро-сонячної енергетичної установки [16] (рис. 4), що являє собою станцію на базі щоглового вітрогенератора з горизонтальною віссю 1 та комплексу фотоелектричних модулів 2 приєднаних до єдиної енергосистеми. Розподіл виробленої електроенергії та автоматизація роботи всієї системи забезпечується гібридним контролером 4. Надлишок виробленої електроенергії накопичується з використанням блока акумуляторних батарей 5. Перетворення постійного струму в змінний для подальшого живлення споживачів 6 здійснюється інвертором 3.

До основних переваг такої автономної системи електрозабезпечення відносять взаємокомпенсацію дефіциту електрогенерації, суть якої полягає у досить високій продуктивності фотоелектричних батарей влітку та відносно низькій взимку. У свою чергу, в літній час щогловий вітрогенератор зазвичай працює в режимі мінімальної потужності, що зумовлено частими безвітряними днями характерними для цієї пори року.

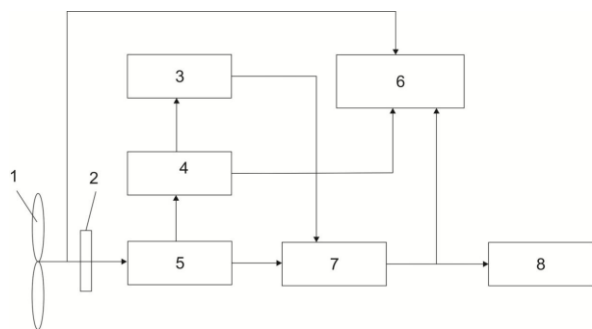


Рис. 3. Схема автономної системи електропостачання на основі вітроенергетичної установки з акумуляторним резервом

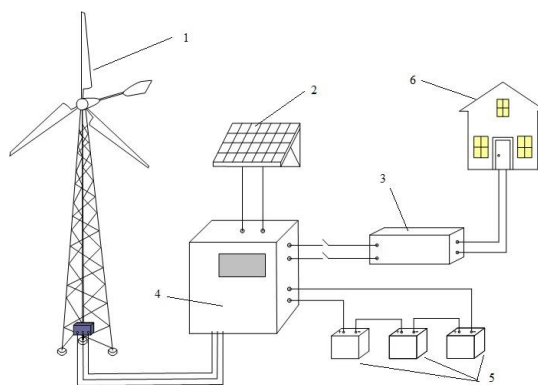
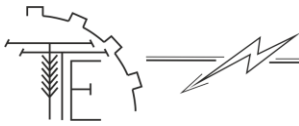


Рис. 4. Схема вітро-сонячної гібридної установки

До спільних недоліків описаних варіантів автономного енергозабезпечення (рис. 3, рис. 4) можна віднести недосконалість системи накопичення енергії, що полягає в необхідності використання дорогих акумуляторних батарей значної ємності. Для першого випадку (рис. 3) така система повинна забезпечити електропостачання споживачів в період штилю, при цьому використання маховика обмежується інерційними характеристиками та невеликими значеннями



максимальної енергоємності.

Для другого варіанту (рис. 4) проблема зменшення загальної ємності акумуляторних батарей частково вирішується за рахунок уже згаданої взаємокомпенсації, проте невиключений варіант дефіциту виробленої енергії при відсутності стабільного вітрового потоку та сонячного випромінювання (штиль в нічний час). Крім того, як показує досвід [9, 10] для роботи вітрогенераторів з горизонтальною віссю обертання в номінальному режимі, необхідною умовою є наявність вітрового потоку з швидкістю в 1...2 рази вищою за середні значення швидкості вітрів, що діють на території Вінницької області впродовж року.

Також доцільним буде використання гребневих вітротурбін, з їх розміщенням на дахах виробничих будівель та споруд поряд із сонячними панелями. До переваг таких вітротурбін відносять [4, 10, 11]: використання ефекту підйому повітряних потоків, що за ламінарного режиму руху та залежно від кута нахилу даху дозволяє отримувати швидкість вітру на гребені в 2–3 рази вище, ніж початкова; сприймання бічного вітру; майже повна безшумність роботи.

Ще одним варіантом автономного електрозабезпечення є використання гібридних систем електропостачання на основі енергії вітру і бензинових електрогенераторів. Поєднання гарантованого джерела енергії – бензинового електрогенератора і нестабільно поновлюваної енергії вітру дозволяє побудувати універсальні системи автономного електропостачання, що забезпечують безперебійне електропостачання споживачів [7]. Така система електропостачання з двома джерелами енергії дозволяє покривати (в певні проміжки часу) потреби енергії, що виробляється, бензиновим генератором при провалах або відсутності вітрового навантаження.

В загальному випадку ця гібридна система (рис. 5) являє собою поєднання різних за природою джерел енергії на шині змінного струму. В період високого значення ресурсів вітру бензиновий генератор відключається.

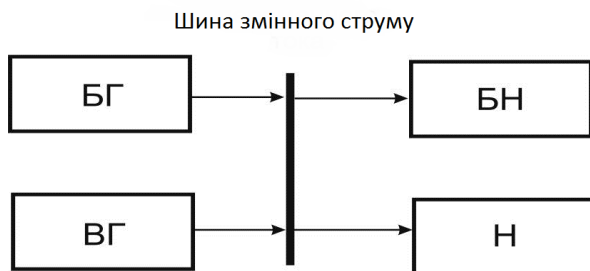


Рис. 5. Гібридна система автономного електропостачання: БГ – бензиновий електрогенератор; ВГ – вітровий генератор; БН – баластне навантаження; Н – навантаження

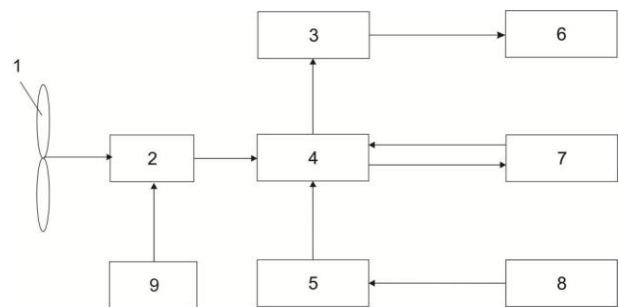


Рис. 6. Схема автономної системи електропостачання на основі вітроенергетичної установки з резервною електростанцією: 1 – вітродвигун; 2 – асинхронний генератор; 3 – інвертор; 4 – комутатор; 5 – паливна електростанція; 6 – споживач електричної енергії; 7 – акумулятор; 8 – установка на біопаливі; 9 – конденсатор

Серед основних недоліків згаданої системи можна відзначити необхідність частих включень і відключень бензинового генератора від шини змінного струму при імпульсному характері вітрової генерації та висока вартість виробленої ним енергії.

Також відома конструкція вітроенергетичної установки автономного електропостачання, резервом в яких виступає паливна електростанція (рис. 6).

Вітродвигун надає рух ротору асинхронного генератора. Конденсатори забезпечують збудження асинхронного генератора з короткозамкненим ротором. Енергія з асинхронного генератора через комутатор та інвертор перетворюється до необхідного рівня напруги і подається споживачеві. Надлишки енергії накопичуються в акумуляторних батареях і використовуються в разі безвітряної погоди. В якості резервного джерела живлення використовується бензо-дизельна електроустановка [6].

Для цієї системи характерними є наявність окремих недоліків, що притаманні для раніше представлених варіантів.

Отже, попри низку очевидних переваг, стохастичний характер альтернативної електрогенерації досить часто призводить до ситуації, коли обсяги виробленої енергії значно перевищують потребу в живленні споживачів та навпаки. Крім того, існують щомісячні, сезонні та річні коливання інтенсивності та доступності відновлювальних джерел енергії. З іншого боку, як показує досвід, потреба в енергії час від часу може змінюватись, що не завжди збігається з періодичністю відновлювальних джерел енергії, створюючи проблеми надійності функціонування автономних енергосистем [12].

Здійснивши аналіз різних варіантів автономного електропостачання, можна зробити висновки, що з метою стабілізації вироблення/споживання енергії доцільним буде застосовувати комбіновану систему автономного електрозабезпечення, яка включатиме основний модуль вітрогенерації та один або декілька резервних модулів (з використанням сонячних панелей та генераторів працюючих на традиційних видах палива). Максимальної ж ефективності такого електрозабезпечення можна досягти лише при умові включення до її складу системи акумулювання (накопичення) енергії (САЕ).

Процес роботи САЕ включає в себе перетворення електричної енергії з одного доступного джерела в інші форми енергії та її зберігання, з можливістю зворотного перетворення у разі потреби назад в електричну. Форма перетворення енергії може бути хімічною, механічною, термічною, електрохімічною та електричною (рис. 7) [12].

Зберігання енергії буде доцільним, у періоди низької потреби споживачів (нічний час, технічне обслуговування основних технологічних електромашин тощо) та при підвищенні затребуваного рівня генерації (збільшення вітрового та/або сонячного навантаження). У той же час, накопичена енергія може бути спожита в періоди збільшення потреби споживачів (виконання енергоємних процесів) та у випадках сповільнення генерації (провали вітрового навантаження, зменшення світлового потоку тощо) [11].

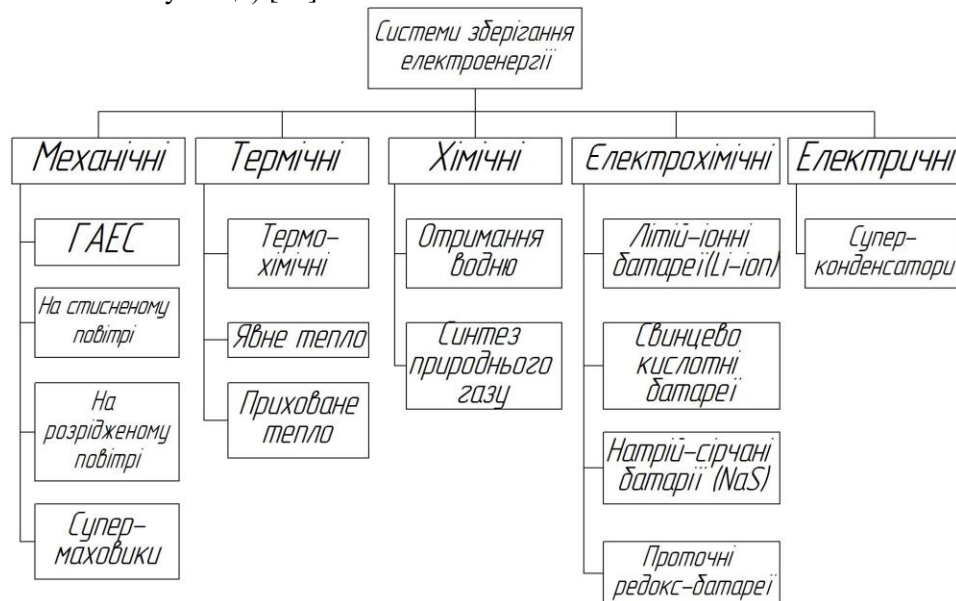
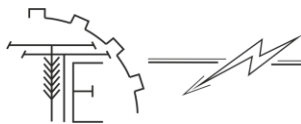


Рис. 7. Основні типи систем зберігання енергії

Відомі засоби та технології резервування енергії мають різну вартість, ємність та швидкодію (рис. 8), а їх вибір потрібно здійснювати з огляду на конкретні вимоги до виробничих процесів підприємства, характеристики графіка добового та річного споживання енергії, склад та параметри автономної енергетичної системи тощо.

Для малих та середніх підприємств аграрного сектору в залежності від вище перерахованих факторів доцільним буде використання в структурі САЕ супер-маховиків, які характеризуються енергетичною ємністю від 1 кВт·год до 100 кВт·год, при цьому тривалість накопичення та віддачі енергії становить 1 хв...1 год [11]. Маховики характеризуються високою надійністю, невисокою вартістю, довговічністю та є екологічно безпечними засобами зберігання енергії. Основне функціональне призначення маховика полягає у формуванні запасу кінетичної енергії від обертового руху з можливістю її перетворення в електричну енергію для подальшої передачі в автономну енергосистему.



Разом із тим, повна відмова від акумуляторних батарей в САЕ може призвести до погіршення керованості автономної енергосистеми. Тому в якості резервного засобу накопичення, крім маховиків варто передбачити використання блоку літій-іонних батарей, які характеризуються високою здатністю до швидкого реагування на коливання дефіциту/надлишку енергії. Проте на відміну від описаних варіантів, основним призначенням цих акумуляторів є виконання функцій диспетчеризації роботи автономної системи, тоді як основним засобом акумуляування буде блок інерційних механічних накопичувачів – маховиків.

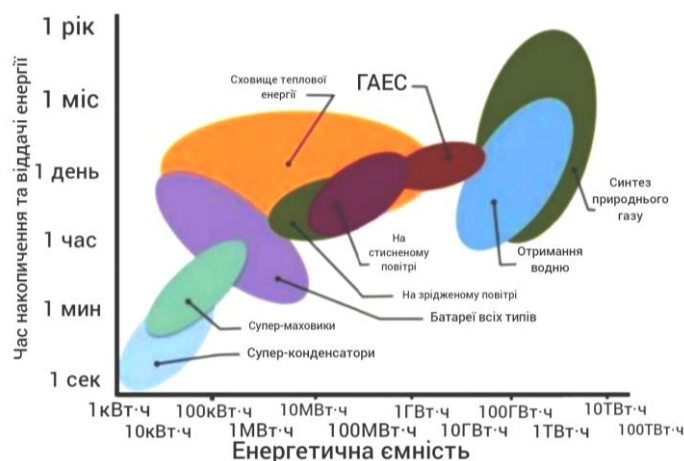


Рис. 8. Характеристики систем акумуляування енергії [9]

В результаті проведеного аналізу, авторами статті було систематизовано та узагальнено інформацію щодо переваг і недоліків використання існуючих варіантів технічного та технологічного забезпечення і запропонована структурна схема автономної гібридної електростанції (рис. 9), що може бути використана для електрозабезпечення малих та середніх сільськогосподарських підприємств.

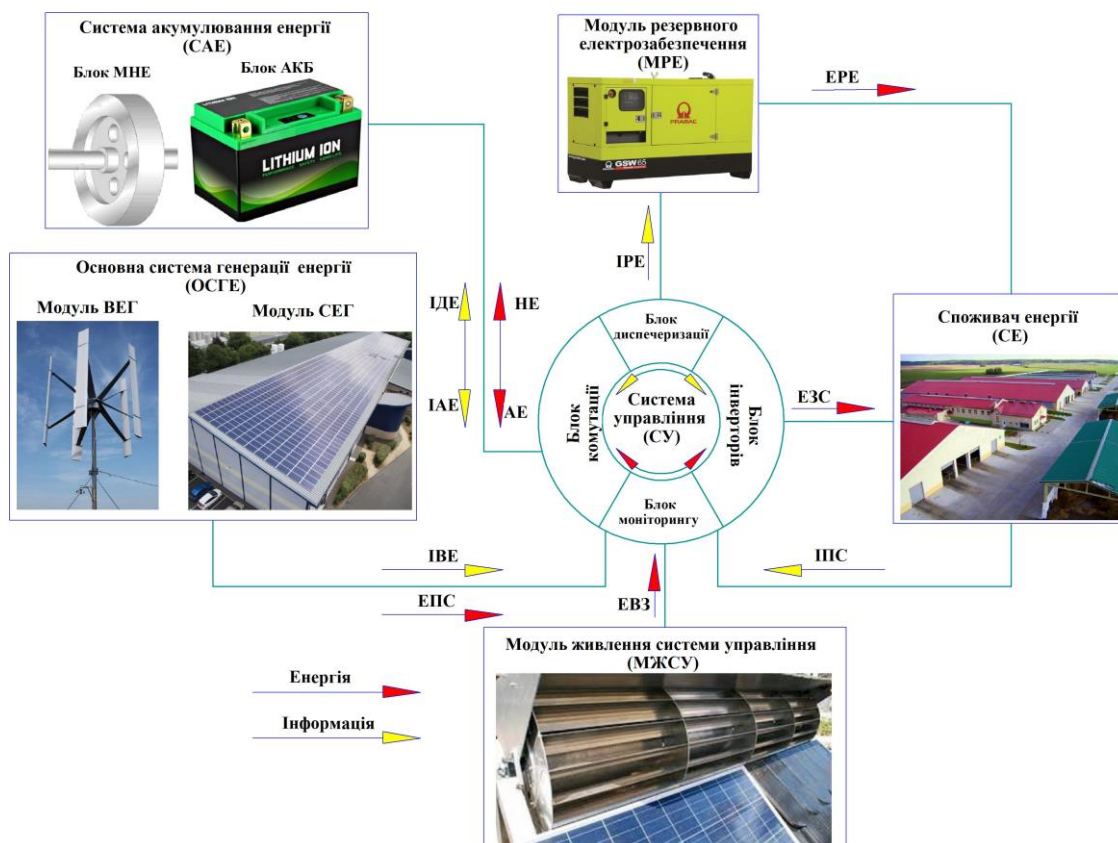
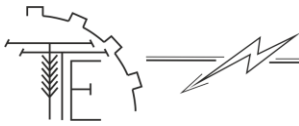


Рис. 9. Гібридна система автономного електрозабезпечення



Основні структурні елементи запропонованої схеми та зв'язки між ними відображені на рис. 9.

Основна система генерації енергії (ОСГЕ) включає в себе модуль вітрової електрогенерації (Модуль ВЕГ) з вертикальними вітроподвигунами розміщеними на щоглах та сонячної електрогенерації (Модуль СЕГ) із встановленими на дахах виробничих приміщень підприємства або на спеціально створених конструкціях (фермах) фотоелектричних сонячних панелей. Функціональне призначенням ОСГЕ полягає в конверсії енергії вітру та сонячного випромінювання в електричну енергію постійного струму (ЕПС) та передачу до блоку комутації системи управління.

Повне керування роботою автономної системи електрозабезпечення відбувається з використанням Системи управління (СУ), яка включає блок комутації, блок моніторингу, блок диспетчеризації та блок інверторів.

Блок комутації – призначений для керування та розподілу потоками електроенергії, що надходить від різних елементів гібридної електростанції.

Блок моніторингу – виконує функції моніторингу, контролю та реєстрації параметрів роботи всіх елементів в режимі реального часу.

Блок диспетчеризації – відповідає за обробку інформації, що отримана від блоку моніторингу, її аналіз та формування команд для оперативного керування станом структурних елементів.

Блок інверторів – призначений для перетворення постійного струму в змінний.

Система акумулювання енергії (САЕ) призначена для накопичення невикористаної споживачем енергії (НЕ) та повернення (АЕ) її при отриманні сигналу про дефіцит потужності (ІДЕ), що виникає у випадках, коли потужність ОСГЕ менша за реальні потреби СЕ, що визначається блоком моніторингу СУ шляхом порівняння інформаційних потоків потреби (ІПЕ) та генерації (ІВЕ). Інформація про обсяг резерву САЕ (ІАЕ) в режимі реального часу надходить до СУ. Функціонування САЕ забезпечується блоком механічного накопичення (МНЕ), що оснащений маховиками з різними інерційними характеристиками та блоком літій-іонних батарей (АКБ).

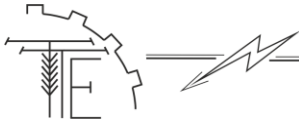
Модуль резервного електрозабезпечення (МРЕ) використовується при отриманні інформаційного сигналу про необхідність резервного живлення (ІРЕ) від блоку диспетчеризації СУ. Формування такої команди СУ відбувається у випадку, коли сумарна потужність струму від ОСГЕ менша за потрібну для живлення СЕ, при умові майже граничного використання запасів САЕ. Пропонується вважати у якості такого стану випадок, коли кінетична енергія повністю перейшла в форму електричної (відбулася зупинка маховиків блоку МНЕ) та після обробки блоком інверторів СУ, у формі змінного електричного струму (ЕЗС) була використана для живлення СЕ, при цьому сумарний рівень заряду літій-іонних батарей зменшився до 10% загальної ємності блоку АКБ. Оскільки МРЕ являє собою дизель-генераторну установку (одну або декілька), подача резервного електричного струму (ЕРЕ) для живлення СЕ відбувається без його перетворення блоком інверторів СУ.

Модуль живлення системи управління (МЖСУ) являє собою повністю автономну електрогенеруючу установку на базі горизонтальних вітротурбін, що монтуються на гребенях дахів приміщень підприємства над фотоелектричними панелями Модуля СЕГ. Призначення МЖСУ полягає у забезпеченні живлення електрообладнання, що входить до всіх перелічених систем, модулів та блоків самої автономної гібридної електростанції, чим і досягається повна енергетична незалежність підприємства від централізованої системи електропостачання.

6. Висновки та перспективи подальших досліджень

В результаті проведених досліджень було обґрунтовано один із можливих шляхів забезпечення енергетичної безпеки стратегічно важливої галузі економіки України – агропромислового комплексу, який полягає у диверсифікації джерел надходження електричної енергії шляхом зменшення частки, що надходить від централізованої мережі та впровадження технологій відновлюваної енергетики аж до повного переходу сільськогосподарських підприємств на автономну модель живлення.

На основі оцінки природно-кліматичного потенціалу Вінницької області було встановлено, що сучасний рівень технічного забезпечення робить можливою практичну реалізацію такої моделі для потреб малих та середніх суб'єктів агробізнесу вже зараз, а стрімкі темпи подальшого розвитку технологій альтернативної енергетики дозволяють прогнозувати формування підґрунтя для широкомасштабної автономізації галузі в найближчому майбутньому.



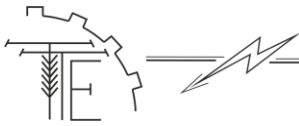
Запропонована та представлена у вигляді структурної схеми макрорівня гібридна автономна електростанція являє собою складну технологічну систему з глибокою взаємоінтеграцією елементів, що враховує практичний досвід міжнародних енергокомпаній та теоретико-методологічні напрацювання вітчизняних та зарубіжних науковців в області електричної інженерії. До основних її переваг можна віднести:

- більш стабільне вироблення електроенергії та забезпечення нею споживачів порівняно із традиційними електроустановками що використовуються сільськогосподарськими товаровиробниками за рахунок застосування двох незалежних модулів ВЕГ та СЕГ;
- невисоку собівартість збереження надлишку електроенергії при умові забезпечення високих функціональних та експлуатаційних показників системи акумулювання енергії, що досягається при включенні до її складу, окрім акумуляторних батарей, маховиків;
- зведення до мінімуму ризиків припинення живлення споживачів при виникненні аварійних ситуацій або технічному обслуговуванні елементів основної системи генерації енергії шляхом використання модуля резервного електропостачання на базі дизель-генераторної установки;
- автономне забезпечення живлення обладнання електростанції за рахунок встановлення на дахах приміщень комплексу горизонтальних гребневих вітротурбін;
- високу маневреність системи автономного електрозабезпечення та швидку її переорієнтацію на затребувані режими роботи в режимі реального часу, що забезпечується системою управління виходячи із реальних потреб для живлення споживачів та потенційних можливостей усіх інших елементів гібридної автономної електростанції.

Таким чином, дана система може бути використана для потреб аграрних підприємств, проте необхідною умовою для її практичного впровадження є більш детальний аналіз та обґрунтування параметрів підсистем представленої схеми макрорівня, що планується здійснити авторами в подальших дослідженнях.

Список використаних джерел

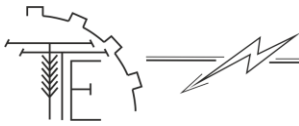
1. Яснолоб І. О., Чайка Т. О., Горб О. О., Радіонова Я. В. Концептуальні засади ефективного функціонування енергетично незалежних сільських територій. *Економіка АПК*. 2019. 3. С. 115-122. doi:10.32317/2221-1055.201903115.
2. Указ Президента України «Стратегія національної безпеки України» від 26.05.2015 № 287/2015. Джерело: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/287/2015#Text>.
3. Розпорядження КМУ «Про схвалення стратегії розвитку експорту виробництва сільського господарства, харчової та переробної промисловості України на період до 2026 року» від 01.07.2019 № 588-р. Джерело: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/588-2019-%D1%80>.
4. Калетнік Г. М. Перспективи підвищення енергетичної автономії підприємств АПК в рамках виконання енергетичної стратегії України. *Вісник аграрної науки Причорномор'я*. 2019. Вип. 4, 104. С. 90-98. DOI: 10.31521/2313-092X/2019-4(104)-10.
5. Шот А. Світові тенденції та перспективи розвитку нетрадиційних та відновлювальних джерел енергії в Україні. *Наукові записки Львівського університету бізнесу та права*. 2011. Вип. 6. С. 220-226.
6. Климко В.І. Вітросонячні системи електроживлення малопотужних споживачів : автореф. дис... канд. техн. наук : 05.09.03 / Нац. ун-т "Львів. Політехніка". Львів, 2016. 20 с.
7. . Щур І. З., Климко В. І. Методика розрахунку показників електропостачання окремого об'єкта від гібридної вітросонячної системи. *Проблеми енергоресурсозбереження в електротехнічних системах. Наука, освіта і практика*. 2014. Вип. 1, 2. С. 83-85.
8. Стаднік М.І., Рогач В.П., Проценко Д.П. Мобільний пристрій для дослідження експлуатаційних параметрів сонячних панелей. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. 2019. 3, 106. С. 100-108. DOI: 10.37128/2520-6168-2019-3-13.
9. Wind Europe. European Statistics – Statistics. Wind energy in Europe in 2018 – Trends and statistics. windeurope.org. URL: <https://windeurope.org/wp-content/uploads/files/about-wind/statistics/WindEurope-Annual-Statistics-2018.pdf>. (дата звернення: 13.09.2020).
10. Chen H., Cong T. N., Yang, W., Tan C., Li Y., Ding Y. Progress in electrical energy storage system: A critical review. *Progress in Natural Science*. 2009. Vol. 19, 3. P. 291–312. DOI: 10.1016/j.pnsc.2008.07.014.



11. Amiryar M. E., Pullen K. R. A Review of Flywheel Energy Storage System Technologies and Their Applications. *Applied Sciences*. 2017. Vol. 7, 3. P. 286-299. DOI: 10.3390/app7030286.
12. The International Energy Agency. Key World Energy Statistics. www.iea.org. URL: <https://www.iea.org/statistics/kwes/>. (дата звернення: 13.09.2020).
13. Lazard. Levelized Cost of Energy and Levelized Cost of Storage 2018. www.lazard.com. URL: <https://www.lazard.com/perspective/levelized-cost-of-energy-and-levelized-cost-of-storage-2018>. (дата звернення: 13.09.2020).
14. Український гідрометеорологічний центр. meteo.gov.ua. URL: https://meteo.gov.ua/ua/33345/climate/climate_stations/. (дата звернення: 13.09.2020).
15. Гунько І.В., Галушак О.О., Кравець С.М. Аналіз технологічних систем. Обґрунтування інженерних рішень: навч. посіб. Вінниця : БНАУ, 2019. 216 с. ISBN 966-8271-77-7.
16. Сайт компанії Атмосфера. Схеми організації ветряних електростанцій. www.atmosfera.ua. URL: <https://www.atmosfera.ua/uk/vitryani-elektrostantsii/sxemi-organizacii-vitryanix-elektrostantsij/>. (дата звернення: 13.09.2020).

References

1. Yasnolob, I.O., Chaika, T.O., Horb, O.O. & Radionova Ya.V. (2019) Kontseptualni zasady efektyvnoho funktsionuvannia enerhetychno nezaleznykh silskykh terytorii [Conceptual foundations of effective functioning of energy independent rural areas]. *Ekonomika APK – The Economy of Agro-Industrial Complex*, 3, 115-122. doi:10.32317/2221-1055.201903115 [In Ukrainian].
2. Ukaz Prezidenta Ukrainy «Stratēhiia natsionalnoi bezpeky Ukrainy» vid 26.05.2015 № 287/2015 [Decree of the President of Ukraine «National Security Strategy of Ukraine» from May 26 2015, № 287/2015]. zakon.rada.gov.ua. Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/287/2015#Text> [in Ukrainian].
3. Rozporiadzhennia KМУ «Pro skhvalennia Stratēhii rozvytku eksportu produktsii silskoho hospodarstva, kharchovoi ta pererobnoi promyslovosti Ukrainy na period do 2026 roku» vid 01.07.2019 № 588-r [The order of the Cabinet of Ministers of Ukraine «On approval of the Strategy for the development of agricultural product export, food and processing industry of Ukraine for the period until 2026» from July 1 2019, № 588-p]. zakon.rada.gov.ua. Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/588-2019-%D1%80> [in Ukrainian].
4. Kaletnyk, G. M. (2019). Perspektyvy pidvyshchennia enerhetychnoi avtonomii pidpriemstv APK v ramkakh vykonannia enerhetychnoi stratēhii Ukrainy [Prospects for increasing energy autonomy of the agriculture in accordance with the energy strategy of Ukraine]. *Vіsnyk agrarnoi nauky Pričornomor'â – Ukrainian Black Sea region agrarian science*, 4, 90-98. doi: 10.31521/2313-092X/2019-4(104)-10 [In Ukrainian].
5. Shot, A.P. (2011). Svitovi tendentsii ta perspektyvy rozvytku netradytsiinykh ta vidnovliuvalnykh dzherel enerhii v Ukraini [World tendencies and prospects of development of non-traditional and renewable energy sources in Ukraine]. *Naukovi zapysky Lvivskoho universytetu biznesu ta prava – Scientific notes of Lviv University of Business and Law*, 6, 220-226 [in Ukrainian].
6. Klymko, V.I. (2016). Vitrosoniachni systemy elektrozhyvlennia malopotuzhnykh spozhyvachiv [Wind-solar power systems for low-power consumers]. *Extended abstract of candidate's thesis*. Lviv: Lviv Polytechnic National University [in Ukrainian].
7. Shchur, I.Z. & Klymko, V.I. (2014). Metodyka rozrakhunku pokaznykiv elektropostachannia okremoho obiekta vid hibrydnoi vitro-soniachnoi systemy [Methods for calculating the power supply indices of an individual object from a hybrid wind-solar system]. *Problemy enerhohorosozberezhenia v elektrotekhnichnykh systemakh. Nauka, osvita i praktyka. Naukove vydannia. – Problems of energy saving in electrical engineering systems. Science, education and practice. Scientific edition*, 1 (2), 83-85 [in Ukrainian].
8. Stadnik, M.I., Protsenko, D.P. & Rohach, V.P. (2019) Mobilnyi prystrii dlia doslidzhennia ekspluatatsiinykh parametriv soniachnykh panelei [Mobile device for investigation of operating parameters of solar panels]. *Tekhnika, enerhetyka, transport APK – Engineering, Energy, Transport AIC*, 3 (106), 100-108. doi: 10.37128/2520-6168-2019-3-13 [In Ukrainian].
9. Wind Europe. European Statistics – Statistics. Wind energy in Europe in 2018 – Trends and statistics. windeurope.org. Retrieved from <https://windeurope.org/wp-content/uploads/files/about-wind/statistics/WindEurope-Annual-Statistics-2018.pdf> [In Ukrainian].



10. Chen, H., Cong, T.N., Yang, W., Tan, C., Li, Y. & Ding, Y. (2009) Progress in electrical energy storage system: A critical review. *Progress in Natural Science*, 19 (3), 291–312. doi: 10.1016/j.pnsc.2008.07.014 [In English].
11. Amiryar, M.E. & Pullen, K.R. (2017) A Review of Flywheel Energy Storage System Technologies and Their Applications. *Applied Sciences*, 7(3), 286. doi:10.3390/app7030286 [In English].
12. The International Energy Agency. Key World Energy Statistics. www.iea.org. Retrieved from <https://www.iea.org/statistics/kwes/> [In English].
13. Lazard. Levelized Cost of Energy and Levelized Cost of Storage 2018. www.lazard.com. Retrieved from <https://www.lazard.com/perspective/levelized-cost-of-energy-and-levelized-cost-of-storage-2018> [In English].
14. Ukrainskyi hidrometeorologichnyi tsentr [Ukrainian Hydrometeorological Center]. meteo.gov.ua. Retrieved from https://meteo.gov.ua/ua/33345/climate/climate_stations/ [in Ukrainian].
15. Hunko, I.V., Halushchak, O.O. & Kravets, S.M. (2019). *Analiz tekhnologichnykh system. Obgruntuvannia inzhenernykh rishen [Analysis of technological systems. Substantiation of engineering decisions]*. Vinnytsia: VNAU. ISBN 966-8271-77-7 [in Ukrainian].
16. Sait kompanii Atmosfera. Skhemy orhanizatsii vitrianykh elektrostantsii [Website of the company Atmosphere. Schemes of organization of wind power plants]. www.atmosfera.ua Retrieved from <https://www.atmosfera.ua/uk/vitryani-elektrostancii/sxemi-organizacii-vitryanix-elektrostancij/> [in Ukrainian].

ПЕРСПЕКТИВЫ И ПРЕДПОСЫЛКИ ВНЕДРЕНИЯ АВТОНОМНЫХ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ АГРОПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

Агропромышленный комплекс является одним из основных наиболее стабильных по объемам поступлений в бюджет межотраслевых формирований, в котором для осуществления производственных процессов потребляются значительные объемы электроэнергии, произведенной с использованием ископаемых, преимущественно импортных, топливных ресурсов, что создает угрозу для эффективного его функционирования и обуславливает актуальность проведения представленных в статье исследований. Целью статьи является оценка потенциала и определение перспективных способов децентрализованного электроснабжения агропромышленных товаропроизводителей на основе анализа современных технико-технологических решений в области электрической инженерии и синтеза перспективной схемы комбинированной системы автономного питания сельскохозяйственных предприятий.

В статье была осуществлена оценка технических и технологических возможностей для использования автономных электроустановок малыми и средними предприятиями аграрного сектора, работающие на принципе конверсии возобновляемых источников с учетом природно-климатического потенциала Винницкой области.

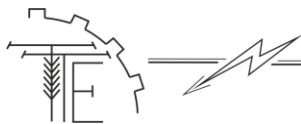
В результате сравнительного анализа эксплуатационных характеристик известных способов накопления электрической энергии было установлено, что в условиях автономного электропитания малых и средних агропромышленных предприятий за счет конверсии альтернативных источников энергии, наиболее функционально и экономически обоснованным вариантом является использование систем аккумулирования энергии на основе маховиков с частичным использованием резервного блока литий-ионных батарей.

Основываясь на отечественном и зарубежном опыте, была предложена перспективная схема комбинированной системы автономного питания малых и средних сельскохозяйственных предприятий и сформированы приоритетные направления дальнейших исследований для повышения эффективности функционирования такой системы.

Исследование технико-технологических предпосылок для разработки комбинированной системы автономного энергообеспечения и ее составляющих осуществляли с применением методов анализа, обобщения и системного подхода. Потенциальные преимущества и эффект от внедрения предложенной схемы основываются на основе законов развития технических и электроэнергетических систем.

Ключевые слова: электроснабжения агропромышленных предприятий, автономная энергосистема, возобновляемые источники энергии, система аккумулирования энергии, маховик, комбинированное электропитания.

Рис. 9. Лит. 16.



PROSPECTS AND BACKGROUND INTRODUCTION OF AUTONOMOUS POWER SUPPLY SYSTEMS FOR AGRICULTURAL ENTERPRISES

The agro-industrial complex is one of the most stable in terms of revenue to the budget of intersectoral formations, in which significant amounts of electricity produced using fossil fuels, mainly imported, fuel resources are consumed for the implementation of production processes, which poses a threat to its effective functioning and makes in the research article. The purpose of the article is to assess the potential and determine promising methods of decentralized power supply for agro-industrial producers based on the analysis of modern technical and technological solutions in the field of electrical engineering and the synthesis of a promising scheme for a combined autonomous power supply system for agricultural enterprises.

The article assessed the technical and technological capabilities for the use of autonomous electrical installations by small and medium-sized enterprises of the agricultural sector, operating on the principle of conversion of renewable sources, taking into account the natural and climatic potential of the Vinnytsia region.

As a result of a comparative analysis of the operational characteristics of the known methods of accumulating electric energy, it was found that in the conditions of autonomous power supply of small and medium-sized agro-industrial enterprises due to the conversion of alternative energy sources, the most functionally and economically justified option is the use of energy storage systems based on flywheels with partial use of a backup unit lithium-ion batteries.

Based on domestic and foreign experience, a promising scheme of a combined autonomous power supply system for small and medium agricultural enterprises was proposed and priority areas for further research were formed to improve the efficiency of such a system.

The study of technical and technological prerequisites for the development of a combined system of autonomous power supply and its components was carried out using methods of analysis, generalization and a systematic approach. The potential advantages and effect of the proposed scheme implementation are based on the laws of development of technical and electric power systems.

Keywords: power supply of agro-industrial enterprises, autonomous power system, renewable energy sources, energy storage system, flywheel, combined power supply.

Fig. 9. Ref. 16.

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ

Купчук Ігор Миколайович – кандидат технічних наук, доцент кафедри загальнотехнічних дисциплін та охорони праці Вінницького національного аграрного університету (вул. Сонячна, 3, м. Вінниця, 21008, Україна, +380978173992, kupchuk.igor@i.ua, <http://orcid.org/0000-0002-2973-6914>).

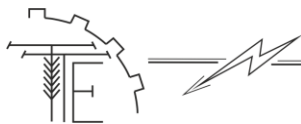
Яропуд Віталій Миколайович – кандидат технічних наук, доцент кафедри машин та обладнання сільськогосподарського виробництва Вінницького національного аграрного університету, (вул. Сонячна, 3, м. Вінниця, 21008, Україна, +380978399834, yaropud77@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0003-0502-1356>).

Телекало Наталія Валеріївна – кандидат сільськогосподарських наук, доцент кафедри рослинництва, селекції та біоенергетичних культур Вінницького національного аграрного університету (вул. Сонячна, 3, м. Вінниця, 21008, Україна, +380673094141, nataliatelekal@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0002-7337-0008>).

Граняк Валерій Федорович – кандидат технічних наук, доцент кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки Вінницького національного аграрного університету (вул. Сонячна, 3, м. Вінниця, 21008, Україна, +380672799498, titanxp2000@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0001-6604-6157>).

Купчук Игорь Николаевич – кандидат технических наук, доцент кафедры общетехнических дисциплин и охраны труда Винницкого национального аграрного университета (ул. Солнечная, 3, г. Винница, 21008, Украина, +380978173992, kupchuk.igor@i.ua, <http://orcid.org/0000-0002-2973-6914>).

Яропуд Виталий Николаевич – кандидат технических наук, доцент кафедры машин и оборудования сельскохозяйственного производства Винницкого национального аграрного университета (ул. Солнечная, 3, г. Винница, 21008, Украина, +380978399834, yaropud77@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0003-0502-1356>).



Телекало Наталья Валерьевна – кандидат сельскохозяйственных наук, доцент кафедры растениеводства, селекции и биоэнергетических культур Винницкого национального аграрного университета (ул. Солнечная, 3, г. Винница, 21008, Украина, +380673094141, nataliiatelekal@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0002-7337-0008>).

Граняк Валерий Федорович – кандидат технических наук, доцент кафедры электроэнергетики, электротехники и электромеханики Винницкого национального технического университета (ул. Хмельницкое шоссе, 95, г. Винница, 21021, Украина, +380672799498, titanxp2000@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0001-6604-6157>).

Kupchuk Ihor – PhD of Engineering, Associate Professor at the Department of General Technical Disciplines and Labor Protection of Vinnytsia National Agrarian University (3, Sonychna St., Vinnytsia, 21008, Ukraine, +380978173992, kupchuk.igor@i.ua, <http://orcid.org/0000-0002-2973-6914>).

Yaropud Vitalii – PhD of Engineering, Associate Professor at the Department of Machinery and Equipment of Agricultural Production of Vinnytsia National Agrarian University (3, Sonychna St., Vinnytsia, 21008, Ukraine, +380978399834, yaropud77@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0003-0502-1356>).

Telekalo Nataliia – PhD of Agricultural Sciences, Associate Professor at the Department of Plant Breeding, Breeding and Bioenergy Crops of Vinnytsia National Agrarian University (3, Sonychna St., Vinnytsia, 21008, Ukraine, +380673094141, nataliiatelekal@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0002-7337-0008>).

Hraniak Valerii – Ph.D of Engineering, Associate Professor at the Power Engineering, Electrical Engineering and Electromechanics of Vinnytsia National Technical University (95, Khmelnytske Shosse St., Vinnytsia, 21021, Ukraine, +380672799498, titanxp2000@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0001-6604-6157>).