**Стаднік М.І.**

д.т.н., професор

Штуць А.А.

к.т.н. ст. викладач

Єленич А.П.

асистент

**Вінницький національний
аграрний університет****Stadnik M.**Doctor of Technical Sciences,
Professor**Shtuts A.**

Ph.D., Senior Lecturer

Yelenych A.

assistant

**Vinnitsia National Agrarian
University****УДК 621.311.24.519.876.5****DOI: 10.37128/2306-8744-2025-1-8****ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДУ
ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ АВТОНОМНОГО
ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ
ТВАРИННИЦЬКОЇ ФЕРМИ НА ОСНОВІ
КОМБІНУВАННЯ БАЗОВИХ ТА
СТОХАСТИЧНИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ**

У статті розглянуто метод забезпечення автономного електропостачання тваринницької ферми, який базується на комбінуванні базових та стохастичних джерел енергії. Запропонований метод передбачає використання різних джерел електроенергії, таких як сонячні електростанції (СЕС), вітрові електростанції (ВЕС), гідроелектростанції (ГЕС) та біогазові установки, з урахуванням графіків навантаження ферми, що змінюються протягом доби. Особливістю методу є можливість динамічного керування енергетичними ресурсами з урахуванням їх стохастичних характеристик залежно від змін величини навантаження, що дозволяє забезпечити надійне і ефективне енергопостачання.

Однією з основних переваг запропонованого методу є використання стохастичних підходів для управління джерелами енергії. Стохастичний метод дозволяє враховувати випадкові коливання у виробництві енергії від відновлюваних джерел, таких як сонце та вітер, а також непередбачувані зміни в енергоспоживанні ферми. Це дає змогу точно прогнозувати і коригувати енергетичні потоки, оптимізуючи використання енергії та знижуючи витрати на резервування потужностей. Застосування стохастичних методів забезпечує високу адаптивність системи до змінних умов навантаження та генерації, що робить її більш гнучкою та надійною.

Запропоновані підходи до відстеження графіка навантаження ферми дозволяють ефективно керувати енергетичними установками, забезпечуючи стабільне постачання електроенергії навіть при змінних умовах навантаження. Важливим аспектом є те, що використання цього методу дозволяє значно знизити потребу в резервуванні потужності, що знижує витрати на енергетичні ресурси та підвищує загальну ефективність системи.

Запропонований метод є перспективним для застосування в автономних системах електропостачання тваринницьких ферм, забезпечуючи стабільне і економічне постачання електроенергії при мінімальних витратах на резервування потужностей. Використання стохастичних методів дозволяє оптимізувати управління енергетичними потоками, підвищуючи надійність і ефективність системи, що сприяє сталому розвитку сільськогосподарських підприємств, знижуючи їх залежність від зовнішніх джерел енергії та підвищуючи енергетичну безпеку.

Ключові слова: автономне електропостачання, комбінування джерел енергії, стохастичні джерела, біогазова установка, енергоефективність, тваринницька ферма, графік навантаження, система управління енергопостачанням.



Постановка проблеми. Тваринницькі ферми є значними споживачами електроенергії, і вартість цієї енергії безпосередньо впливає на собівартість продукції та її конкурентоспроможність на ринку. Крім того, сучасні технологічні процеси, що використовуються на фермах, вимагають надійного електропостачання та високої якості електроенергії. Однак у сільській місцевості через зношеність обладнання розподільчих мереж якість енергії часто не відповідає встановленим стандартам. Це створює додаткові труднощі для фермерських господарств, адже нестабільне енергопостачання може призвести до збоїв у технологічних процесах, що, у свою чергу, впливає на якість продукції.

Враховуючи ці проблеми, одним із можливих рішень є побудова систем електропостачання, що використовують альтернативні джерела енергії, такі як сонячна, вітрова, біогазова та гідроелектрична енергія. В умовах сучасних викликів, зокрема війни, забезпечення безперебійного електрозабезпечення для таких підприємств, як тваринницькі ферми, набуває особливої актуальності. Для ефективного використання наявних енергетичних установок необхідно узгодити рівень генерації енергії з графіком навантаження, що визначається технологічним процесом та наявним обладнанням ферми.

Навантаження на фермах можна поділити на постійні та стохастичні. Постійні навантаження визначаються стабільними процесами, такими як освітлення та вентиляція, а стохастичні змінними процесами, такими як потреби в електроенергії для обігріву чи зрошення в залежності від погодних умов. З огляду на це виникає необхідність постійного відстеження графіка навантаження та вибору відповідних джерел відновлювальної енергії. Першочергово слід використовувати стохастичні джерела енергії, такі як сонячні та вітрові установки, а потім постійні джерела, з можливістю накопичення енергії для подальшого використання.

Відповідно до [13] «Енергетичної стратегії України на період до 2035 року», розвиток енергетики на основі відновлювальних джерел енергії (ВДЕ) є важливим напрямом. Зокрема, передбачається збільшення частки ВДЕ (включаючи гідрогенерацію) у загальній генерації електроенергії до 25% до 2035 року. Це набуває особливої актуальності для України, враховуючи залежність від імпорту енергоносіїв, зношеність традиційних енергетичних установок, міжнародні зобов'язання та загострення екологічних проблем. Тому необхідно системно вирішувати проблеми інтеграції ВДЕ, щоб максимально ефективно використовувати їхні

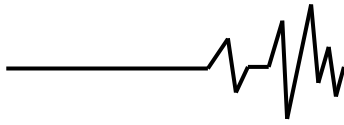
можливості, уникнути зниження надійності режимів роботи електричних мереж та забезпечити високу якість генерованої енергії.

Сучасні підходи до формування енергосистем здебільшого мають детермінований характер, однак наявність варіативних джерел енергії вимагає застосування стохастичних підходів до визначення критеріїв оптимальності та постановки задач оптимізації. Для досягнення високих техніко-економічних показників у застосуванні ВДЕ, стабільних робочих параметрів енергетичного обладнання та стабільного енергопостачання споживачів, необхідно створювати комбіновані енергосистеми (КЕС). Такі системи можуть працювати в паралельному, послідовному або послідовно-паралельному режимах і поєднувати ВДЕ з технологіями традиційної енергетики.

Оптимальне співвідношення елементів у КЕС на основі ВДЕ визначається з урахуванням багатьох важливих факторів, таких як рівень забезпечення регіону традиційними і нетрадиційними джерелами енергії, кліматичні умови, структура систем постачання та споживання енергії, вимоги до якості енергопостачання, екологічні та економічні фактори. Можливі варіанти комбінованих систем можуть включати повністю автономні системи або ті, що підключені до загальної енергосистеми, з накопиченням енергії або без нього, а також з використанням лише відновлювальних джерел енергії чи у поєднанні з паливними генераторами.

Основною проблемою є розробка ефективних систем електропостачання для тваринницьких ферм, що поєднують альтернативні джерела енергії, інтеграцію стохастичних підходів до управління енергетичними потоками та оптимізацію використання енергії в умовах змінного навантаження. Рішення цієї проблеми дозволить забезпечити стабільне та ефективне енергопостачання для фермерських господарств, зменшити залежність від традиційних джерел енергії та підвищити конкурентоспроможність продукції.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Аналіз останніх досліджень і публікацій за 2017-2025 рр. в галузі забезпечення автономного електропостачання тваринницьких ферм, зокрема на основі комбінування базових та стохастичних джерел енергії, вказує на активний розвиток цієї теми, що сприяє підвищенню енергоефективності та надійності енергетичних систем у сільському господарстві. Ось основні напрямки, які розглядаються в останніх публікаціях [1,2,3,4,5,6,7,11,13,17]:



1. Комбінування відновлювальних джерел енергії. Дослідження вказують на можливість використання відновлювальних джерел енергії (сонячних, вітрових, біогазових установок) у системах автономного електропостачання для тваринницьких ферм. Відновлювальні джерела дозволяють зменшити залежність від зовнішніх енергетичних постачальників і підвищити енергоефективність, особливо в умовах віддалених територій. Відзначено, що інтеграція таких джерел з базовими джерелами енергії (наприклад, дизельними генераторами) дозволяє забезпечити стабільність електропостачання в умовах змінних навантажень і погодних умов.

2. Моделювання та оптимізація енергетичних систем. Багато досліджень спрямовані на створення математичних моделей для оптимізації енергетичних систем автономного електропостачання. Це включає моделювання комбінованих систем, які використовують як постійні, так і стохастичні джерела енергії. Зокрема, розроблені методи для прогнозування навантаження та управління енергоспоживанням, що дозволяють оптимізувати роботу біогазових установок, сонячних панелей та інших джерел.

3. Використання біогазових установок. Одним із найбільш перспективних напрямків є використання біогазових установок для генерації електричної енергії на тваринницьких фермах. Біогаз може бути ефективно використаний для забезпечення енергетичних потреб ферм, а також для вирішення проблем утилізації органічних відходів. Останні дослідження показують, що біогазові установки можуть забезпечити ферми значною кількістю енергії, зменшуючи витрати на енергопостачання та покращуючи екологічну ситуацію.

4. Стохастичні методи управління енергетичними системами. Стохастичні методи стають все більш популярними для прогнозування і управління енергетичними потоками в умовах змінних джерел енергії. Вони дозволяють враховувати невизначеність, яка виникає через змінні погодні умови (наприклад, сонячне світло або швидкість вітру), що важливо для ефективного управління гібридними системами електропостачання. Використання таких методів дозволяє знижувати витрати на резервування потужностей та покращувати енергетичну стабільність.

5. Підвищення надійності автономних систем. Надійність автономних систем електропостачання є критично важливою для забезпечення безперебійної роботи тваринницьких ферм. Дослідження, проведені в 2017-2025 роках, вказують на розробку нових

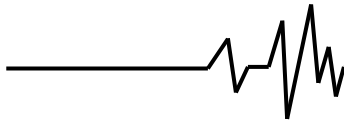
підходів до моніторингу та управління енергетичними системами, що дозволяють вчасно реагувати на можливі збої в роботі джерел енергії. Важливим є також розробка систем резервування енергії, що гарантують безперебійне електропостачання в разі відмови основних джерел.

6. Економічна ефективність та сталий розвиток. Останні публікації також розглядають економічну ефективність використання комбінованих систем автономного електропостачання. Зокрема, аналізується економія енергії та зниження витрат на електропостачання ферм завдяки інтеграції відновлювальних джерел енергії та використанню накопичувачів енергії. Встановлено, що такі системи є економічно вигідними для малих та середніх ферм, а також сприяють сталому розвитку сільського господарства.

Останні дослідження підтверджують перспективність комбінування базових та стохастичних джерел енергії для забезпечення автономного електропостачання тваринницьких ферм. Вони сприяють підвищенню енергоефективності, надійності та економічної вигоди таких систем. Використання новітніх методів моделювання та оптимізації, а також стохастичних підходів до управління енергетичними потоками дозволяє досягти високої стабільності енергопостачання навіть у складних умовах.

Мета дослідження. Мета дослідження полягає в забезпеченні безперебійного електропостачання для тваринницької ферми шляхом інтеграції та ефективного використання стохастичних, постійних і зарезервованих джерел електричної енергії. Це досягається завдяки оптимальному керуванню величиною виробленої енергії від стохастичних джерел, а також ефективним використанням зарезервованої потужності та потужності біогазових установок, з урахуванням фактичного графіка навантаження ферми. Врахування змін у навантаженні на фермі дозволяє адаптувати енергетичну систему до змінних умов, зокрема до коливань у виробництві енергії від відновлювальних джерел (сонячних, вітрових), а також забезпечити належне резервування енергії для покриття пікових навантажень та непередбачуваних ситуацій.

Завдяки такому підходу, можливо забезпечити стабільне електропостачання ферми, знизити витрати на енергоресурси та підвищити енергоефективність системи. Додатково, управління енергетичними потоками на основі стохастичних методів дозволяє зменшити вплив непередбачуваних змін у



навантаженні та забезпечити надійність енергетичних постачань, що є особливо важливим для автономних систем електропостачання тваринницьких ферм, де безперебійне живлення є критично важливим для підтримки технологічних процесів та забезпечення стабільної роботи підприємства.

Основні результати дослідження.

Аналіз можливих джерел для покриття графіку навантаження. Для забезпечення безперебійного електропостачання тваринницької ферми важливо правильно обрати джерела енергії, які можуть покривати змінний графік навантаження. В даному дослідженні розглядаються як стохастичні, так і постійні джерела електричної енергії. Кожне з цих джерел має свої переваги та недоліки, що потрібно враховувати при побудові енергетичної системи ферми.

Проведено аналіз літературних джерел [1,2,10,20] та вибрано коефіцієнт автокореляції він використовується між значеннями процесу в різні моменти часу:

$$r_k = \frac{\sum_{i=1}^{n-k} (x_i - \bar{x})(x_{i+k} - \bar{x})}{\sum_{i=1}^{n-k} (x_i - \bar{x})^2} \quad (1)$$

де:

- x_i – значення процесу в момент часу i ;
- $\bar{x}$ – середнє значення;
- k – зсув у часі.

Можливо використовувати у розрахунках ентропію яка, є мірою невизначеності або випадковості процесу. Вона обчислюється виразом:

$$H = -\sum_{i=1}^n p_i \log(p_i), \quad (2)$$

p_i – ймовірність кожного стану процесу.

Стохастичні джерела енергії включають відновлювальні джерела, потужність яких залежить від природних умов, таких як вітер, сонячне випромінювання, гідроенергетичний потенціал. До таких джерел відносяться:

- Сонячні електростанції (СЕС): потужність сонячних панелей залежить від інтенсивності сонячного випромінювання, що змінюється в залежності від погодних умов.

- Вітрові електростанції (ВЕС): потужність вітрових турбін залежить від швидкості вітру, яка може значно коливатися.

- Гідроелектростанції (ГЕС): потужність залежить від рівня води та швидкості течії, що також є змінною величиною.

Постійні джерела енергії включають традиційні джерела електричної енергії, що

мають стабільну потужність, незалежну від природних умов:

• Біогазові установки: виробляють енергію за рахунок біомаси та органічних відходів, їх потужність може бути стабільною при належному обслуговуванні та наявності сировини.

Характеристика стохастичності джерел енергії. Для кожного з стохастичних джерел енергії можна визначити показники стохастичності, які характеризують їх непередбачуваність і змінність. Одним із основних показників є коефіцієнт варіації (CV), який визначає відхилення потужності від середнього значення в залежності від часу.

Формула для визначення коефіцієнта варіації [21] виглядає так:

$$CV = \frac{\sigma}{\mu} \quad (3)$$

де:

- σ – стандартне відхилення потужності джерела,
- μ – середнє значення потужності джерела.

Іншим показником є кореляція між змінами в потужності різних джерел енергії, що дозволяє оцінити, наскільки ефективно можна комбінувати різні джерела для покриття навантаження.

Для Вінниччини можна провести розрахунок стохастичних показників, таких як коефіцієнт варіації для сонячних та вітрових джерел, використовуючи дані про інтенсивність сонячного випромінювання (сонячне випромінювання є прогнозованою величиною, можливо, від погодних умов) та швидкість вітру в регіоні.

- Сонячне випромінювання: за даними середнього річного сонячного випромінювання в Вінницькій області, коефіцієнт варіації може складати 0,15 – 0,25 в залежності від сезону [15,16].

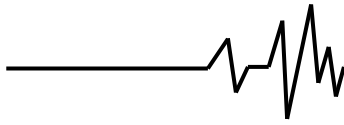
- Вітрові умови: для ВЕС в Вінницькій області коефіцієнт варіації може бути в межах 0,2 – 0,4, оскільки швидкість вітру змінюється значно частіше [16].

Систематизація ВДЕ за рівнем стохастичності. На основі розрахованих коефіцієнтів варіації можна систематизувати відновлювальні джерела енергії за рівнем стохастичності:

1. Сонячні електростанції (СЕС): середній коефіцієнт варіації - 0,15 – 0,25 [10,11,17].

2. Вітрові електростанції (ВЕС): середній коефіцієнт варіації - 0,2 – 0,4 [10,11].

3. Гідроелектростанції (ГЕС): коефіцієнт варіації може бути від 0,1 до 0,3, залежно від умов водопостачання [12].



Алгоритм для керування джерелами енергії. Алгоритм керування енергетичною системою ферми з урахуванням стохастичних та постійних джерел може включати такі етапи:

1. Оцінка поточного навантаження ферми: на основі фактичного графіка навантаження визначається потреба в енергії.

2. Оцінка доступної потужності від джерел: на основі погодних умов та графіків генерації сонячних, вітрових та біогазових установок обчислюється доступна потужність.

3. Розподіл енергії в системі автономного електропостачання з урахуванням реального рівня споживання, обсягів генерації від різних джерел та здатності системи накопичувати енергію. Енергія, отримана від сонячних панелей і вітрових електростанцій, перш за все використовується для покриття базового навантаження ферми. До базового навантаження належать освітлення, робота вентиляційних систем, насосів для водопостачання та інших критично важливих енергоспоживачів. Це дозволяє забезпечити стабільну роботу основних систем ферми без використання вкопного палива.

У періоди високої генерації, наприклад, у сонячний день або при сильному вітрі, надлишкова енергія спрямовується на накопичення. Для цього використовуються акумуляторні батареї, які зберігають енергію для подальшого використання у вечірній час, уночі або в періоди низької генерації. Додатково надлишкова енергія може використовуватися для роботи біогазових установок, що дозволяє виробляти паливо для резервних генераторів.

У випадках, коли енергії від відновлюваних джерел недостатньо (наприклад, у безвітряні ночі), система переходить на резервне забезпечення. Це включає використання енергії з акумуляторів або запуск базових джерел. Такий підхід гарантує безперебійне енергопостачання ферми навіть у складних умовах.

Для досягнення максимальної ефективності розподілу енергії використовується інтелектуальна система управління. Вона моніторить рівень генерації та споживання енергії в реальному часі, прогнозує майбутню генерацію на основі метеорологічних даних та оптимізує заряд і розряд акумуляторів. Це дозволяє мінімізувати витрати палива і забезпечити ефективне використання всіх доступних джерел енергії.

Такий підхід до розподілу енергії дозволяє не лише забезпечити стабільну роботу ферми, а й зменшити вплив на довкілля, скоротивши використання вкопного палива.

Розподіл енергії з урахуванням стохастичності джерел. У системі автономного електропостачання ферми важливим аспектом є

використання джерел енергії з найвищим рівнем стохастичності, тобто тих, які мають найбільшу варіативність у генерації енергії в залежності від зовнішніх умов. У першу чергу це стосується вітрових електростанцій, оскільки генеровану ними енергію важко передбачити через змінність швидкості вітру. Вітрові турбіни можуть виробляти енергію в одних умовах і не працювати зовсім в інших, що робить їх найбільш стохастичним джерелом енергії.

З цієї причини вітрові електростанції використовуються для покриття частини базового навантаження ферми, коли умови для їх роботи є сприятливими. Вони можуть забезпечувати енергією освітлення, вентиляційні системи, а також допомагати у живленні насосів для водопостачання, коли швидкість вітру достатня для ефективної генерації. У разі надлишкової генерації енергії від вітрових турбін, вона направляється на зарядку акумуляторів або використовується для роботи біогазових установок.

Однак, оскільки вітер - це джерело з високим рівнем варіативності, система управління постійно моніторить його стан і коригує розподіл енергії в залежності від реальних умов. Якщо вітер слабшає, система автоматично переключається на інші джерела енергії, наприклад, сонячні панелі, або використовує акумулятори для покриття енергетичних потреб.

Таким чином, вітрові електростанції, через свою стохастичну природу, є пріоритетними джерелами енергії для покриття змінного навантаження ферми. Це дозволяє максимально ефективно використовувати доступні ресурси та зменшити залежність від базових джерел енергії, таких як дизельні генератори.

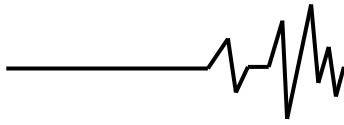
3. Адаптація до змін: в разі зниження виробництва енергії від стохастичних джерел, система автоматично переключається на біогазові установки або резервну енергію.

Алгоритм має враховувати можливість зберігання енергії в акумуляторах або інші методи накопичення, щоб забезпечити стабільне постачання енергії у випадку нестабільності виробництва від відновлювальних джерел.

- Для Вінниччини значення стохастичних показників для сонячних та вітрових джерел дозволяють прогнозувати їх ефективність та можливість комбінування.

- Розроблений алгоритм дозволяє адаптувати енергетичну систему до змінних умов, забезпечуючи ефективне використання енергії та зниження витрат на електропостачання.

Розрахунок коефіцієнта варіації для сонячної електростанції (SEC). Для розрахунку коефіцієнта варіації (CV) для сонячної



електростанції необхідно мати дані про середню потужність СЕС за певний період часу та стандартне відхилення потужності.

1). Для прикладу візьмемо дані: [22].

1. Середня потужність СЕС $\mu=50$ kW,

2. Стандартне відхилення потужності $\sigma=12$ kW.

Розрахунок коефіцієнт варіації

визначається за формулою:

$$CV = \frac{\sigma}{\mu}$$

Підставимо значення:

$$CV = \frac{12}{50} = 0,24$$

Коефіцієнт варіації для сонячної електростанції складає 0.24, що вказує на помірну змінність потужності цього джерела енергії. Це означає, що потужність сонячної станції може змінюватися на 24% від середнього значення.

2). Розрахунок коефіцієнта варіації для вітрової електростанції (ВЕС). Для вітрової електростанції також необхідно мати середнє значення потужності та стандартне відхилення.

1. Для прикладу візьмемо дані середня потужність ВЕС $\mu=70$ kW,

2. Стандартне відхилення потужності $\sigma=28$ kW.

$$CV = \frac{28}{70} = 0,4$$

Коефіцієнт варіації для вітрової електростанції складає 0.4, що вказує на високий рівень змінності потужності. Це означає, що потужність може змінюватися на 40% від середнього значення, що робить цей джерело енергії більш непередбачуваним у порівнянні з сонячною електростанцією.

3). Розрахунок сумарної потужності для комбінованої системи (СЕС + ВЕС). Для комбінованої системи з сонячною та вітровою електростанцією потрібно розрахувати сумарну потужність, яка буде доступна для покриття навантаження на фермі. Для цього можна використати методи комбінування стохастичних джерел: [12,13].

- Потужність СЕС: $P_{СЕС}=50$ kWP,

- Потужність ВЕС: $P_{ВЕС}=70$ kWP,

- Коефіцієнт варіації для СЕС: $CV_{СЕС}=0,24$,

- Коефіцієнт варіації для ВЕС: $CV_{ВЕС}=0,4$.

Розрахунок сумарної потужності. Для комбінованої системи, якщо джерела незалежні, сумарне стандартне відхилення можна обчислити за формулою:

$$\sigma_{total} = \sqrt{\sigma_{СЕС}^2 + \sigma_{ВЕС}^2} \quad (4)$$

де:

$$\sigma_{СЕС} = \mu_{СЕС} \cdot CV_{СЕС} = 50 \cdot 0,24 = 12 \text{ kW}$$

$$\sigma_{ВЕС} = \mu_{ВЕС} \cdot CV_{ВЕС} = 70 \cdot 0,4 = 28 \text{ kW}$$

Тепер обчислюємо сумарне стандартне відхилення:

$$\sigma_{total} = \sqrt{12^2 + 28^2} = \sqrt{144 + 784} = \sqrt{928} \approx 30,4 \text{ kW}$$

Сумарна середня потужність комбінованої системи:

$$\mu_{total} = \mu_{СЕС} + \mu_{ВЕС} = 50 + 70 = 120 \text{ kW}$$

Сумарна потужність комбінованої системи з СЕС і ВЕС складає 120 kW, а стандартне відхилення потужності - 30.4 kW. Таким чином, комбінована система забезпечує надійне покриття навантаження з урахуванням змінності кожного джерела.

4). Розрахунок ймовірності покриття навантаження. Для оцінки ймовірності того, що комбінована система покриє навантаження, можна використовувати нормальний розподіл. Якщо припустити, що потужність комбінованої системи розподіляється нормально, то можна обчислити ймовірність того, що потужність системи буде більше або дорівнювати навантаженню ферми.

Ймовірність того, що потужність буде достатньою для покриття навантаження:

$$P(P_{total} \geq P_{фер.}) = 1 - \Phi\left(\frac{P_{фер.} - \mu_{total}}{\sigma_{total}}\right) \quad (5)$$

де:

- Середнє навантаження ферми:

$P_{фер.}=80$ kWP,

- Сумарна потужність комбінованої

систем: $\mu_{total}=120$ kW,

- Надлишок потужності для накопичення:

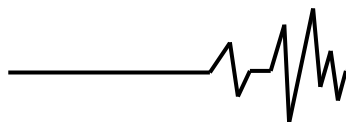
$$P_{нак.} = \mu_{total} - P_{фер.} = 120 - 80 = 40 \text{ kW}$$

Розрахунок накопичення енергії. Якщо накопичувач має ефективність 90%, то кількість енергії, яку можна зберегти на день (24 години):

$$E_{нак.} = P_{нак.} \cdot 24 \cdot 0,9 = 40 \cdot 24 \cdot 0,9 = 864 \text{ kW} / \text{год}.$$

Завдяки накопиченню енергії в акумуляторах можна забезпечити ферму енергією на 864 кВт·год на добу, що дає значну запасну потужність для покриття пікових навантажень або періодів низької генерації від СЕС та ВЕС [1,2,3]

5). Проведемо для прикладу розрахунок економії енергії для ферми. Для ферми великої рогатої худоби (ВРХ) можна розрахувати економію енергії, яку дасть використання



запропонованого методу з комбінуванням джерел енергії та накопиченням:

- Середнє добове навантаження ферми: $P_{\text{фер.}} = 80 \text{ kW}$,
- Потужність, що виробляється СЕС: $P_{\text{СЕС}} = 50 \text{ kW}$,
- Потужність, що виробляється ВЕС: $P_{\text{ВЕС}} = 70 \text{ kW}$,
- Потужність біогазової установки: $P_{\text{біогаз}} = 30 \text{ kW}$,
- Надлишок енергії для накопичення: $P_{\text{нак.}} = 20 \text{ kW}$.

Розрахунок економії використання комбінованої системи дозволяє зменшити витрати на електроенергію, оскільки частина енергії виробляється за рахунок відновлювальних джерел. При цьому енергія, що накопичується, використовується в періоди пікових навантажень [2,9,13]

Економія на добу:

$$E_{\text{ек.}} = P_{\text{фер.}} - (P_{\text{СЕС}} + P_{\text{ВЕС}} + P_{\text{біогаз}}) = 80 - (50 + 70 + 30) = 82.8 \text{ кВт·год / добу}$$

Завдяки використанню комбінованої системи та накопичення енергії, ферма економить 82.8 кВт·год на добу, що є значною економією енергії для фермерського господарства.

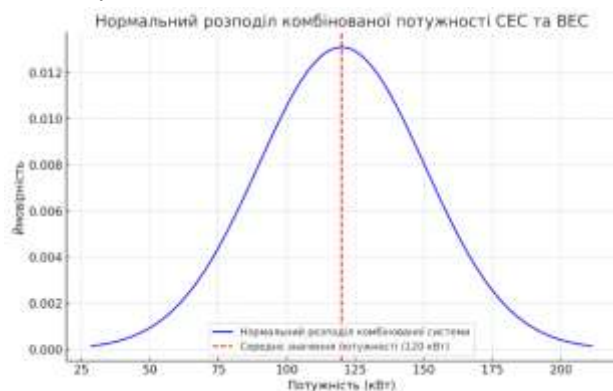


Рис. 1. Нормальний розподіл комбінованої потужності для СЕС та ВЕС. Лінія показує ймовірність різних значень потужності в межах трьох стандартних відхилень від середнього значення. Червона пунктирна лінія вказує на середнє значення комбінованої потужності, яке дорівнює 120 кВт. Цей графік ілюструє, як варіативність потужності в системі з стохастичними джерелами (СЕС та ВЕС) може бути описана через нормальний розподіл.

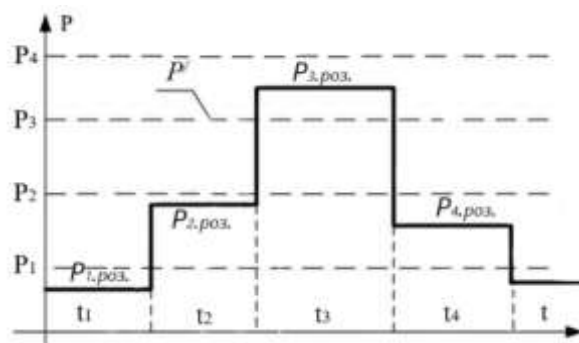


Рис. 2. Графік навантаження ферми включає криві для рівнів потужності $P_{1 \text{роз.}}$, $P_{2 \text{роз.}}$, $P_{3 \text{роз.}}$, $P_{4 \text{роз.}}$ а також графік покриття, що відповідає потужностям P_1, P_2, P_3, P_4 . Графік покриття побудовано з урахуванням керування фактичною потужністю споживання [3,4].

У випадку дискретного керування потужністю, що враховує зміни графіка навантаження (графік), усуваються додаткові витрати електроенергії, пов'язані з часом включення та вимкнення для кожної операції (графік).

Цей графік показує, як змінюється величина параметра P залежно від часу t . Відрізки часу між різними рівнями параметра P (від P_1 до P_4) чітко позначені на осі часу. Для точного відображення цих відрізків необхідно визначити, на яких саме ділянках осі часу вони будуть зображені.

Алгоритм передбачає запис початкових умов та графіка споживання електроенергії, перевірку наявності електроенергії на СЕС, ГЕС, ВЕС та порівняння їх потужностей із однією з генераторних груп на біогазі, якщо вистачає то забезпечується споживання, якщо ні то виконується запуск генераторів на біогазі, а електроенергія відновлювальних джерел переводиться на накопичення.

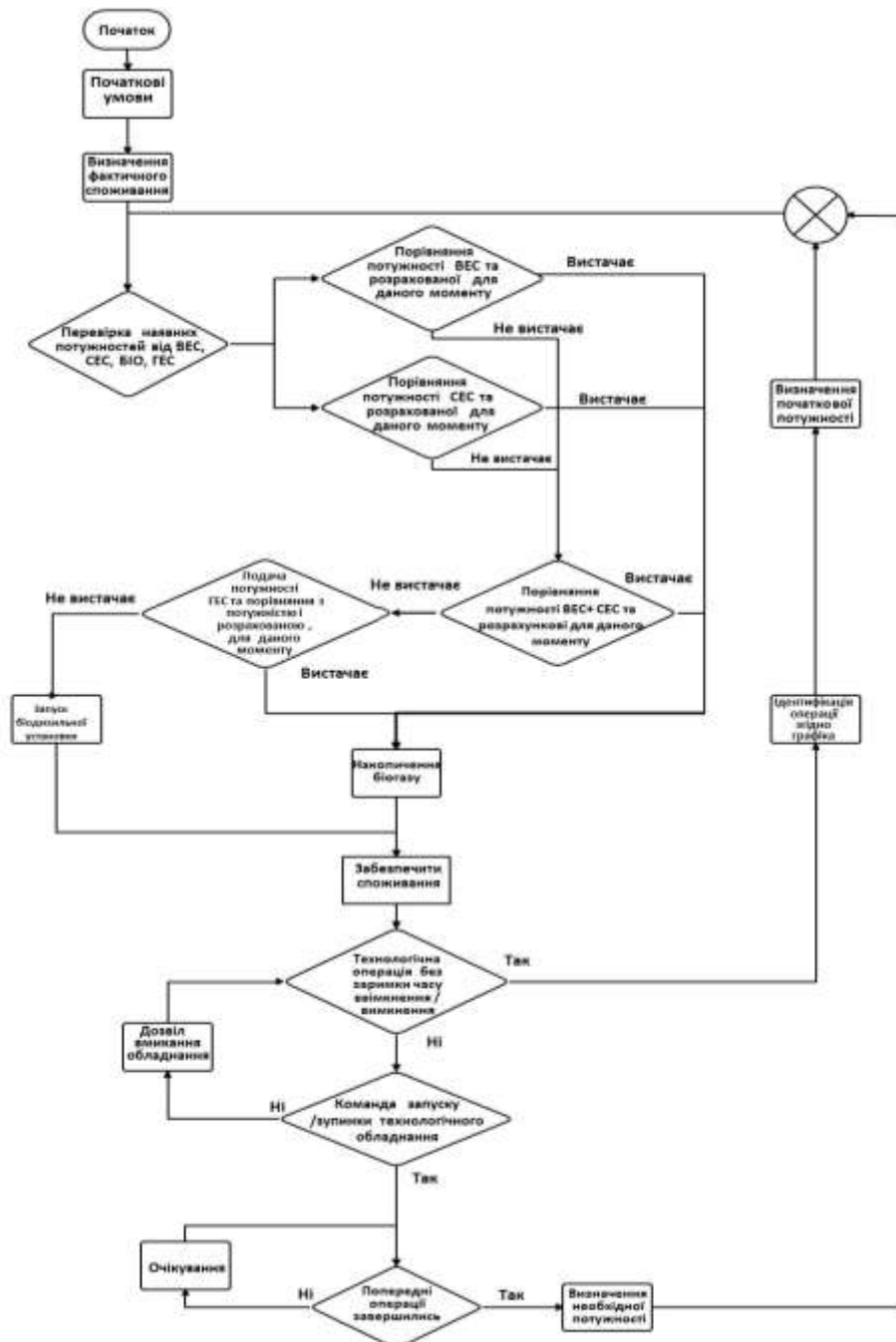
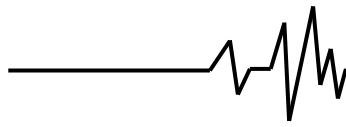


Рис. 3. Алгоритм покриття графіку електроспоживання тваринницької ферми з урахуванням стохастичності ВДЕ.

Для того, щоб розписати алгоритм покриття графіку електроспоживання тваринницької ферми у вигляді системи рівнянь, необхідно детально описати параметри, які впливають на навантаження, а також взаємозв'язки між ними. Ось можливий підхід, з урахуванням [1,2,3,4,8].

1. Визначення навантаження на ферму:

$$L(t) = f(P(t), C(t), T(t), H(t)) \quad (5)$$

де:

- $L(t)$ навантаження на ферму в часі t ,
- $P(t)$ кількість тварин на фермі в часі t ,

- $C(t)$ кількість кормів, що споживаються тваринами в часі t ,

- $T(t)$ температура на фермі в часі t ,

- $H(t)$ вологість на фермі в часі t .

Якість можна розписати у вигляді системи рівнянь: прив'язати до алгоритму

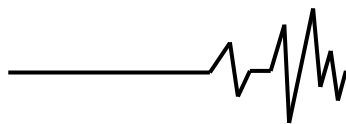
2. Моделювання споживання корму:

$$C(t) = P(t) \cdot c \quad (6)$$

де:

- c середнє споживання корму на одну тварину за одиницю часу.

3. Моделювання температури і вологості:



$$T(t)=T_0+\Delta T(t) \quad (7)$$

$$H(t)=H_0+\Delta H(t) \quad (8)$$

$$L(t)=P(t) \cdot (a_1 \cdot T(t) + a_2 \cdot H(t) + a_3 \cdot C(t)) \quad (6)$$

де:

a_1, a_2, a_3 коефіцієнти, що визначають вплив температури, вологості та корму на навантаження.

де:
- T_0 і H_0 початкові значення температури та вологості на фермі,
- $\Delta T(t)$ і $\Delta H(t)$ зміни температури та вологості в часі.

Ці рівняння можна використовувати для побудови алгоритму, який відслідковує зміну навантаження на ферму в залежності від різних факторів, зокрема кількості тварин, споживання корму, температури та вологості.

4. Аналіз навантаження на базі поточного стану:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{На відрізку часу } 0 - t_1 \\ \text{якщо } P_B > P_{1\text{розр.}} \Rightarrow \text{живл. від ВЕС} \\ \Delta P_B - P_{1\text{розр.}} > 0 \Rightarrow \text{на накопичення} \\ \text{якщо } P_B < P_{1\text{розр.}} \Rightarrow P_{CB} + P_{CC} > P_{\text{розр.}} \\ \text{На відрізку часу } t_1 - t_2 \\ P_B + P_C - P_{2\text{розр.}} > 0 \Rightarrow \text{на накопичення} \\ \text{при зменшенні навантаження умови повертаються, } P_B \text{ повністю на накопичення} \\ P_B + P_C - P_{2\text{розр.}} < 0 \Rightarrow \text{підключаємо } P_B \\ \text{На відрізку часу } t_2 - t_3 \\ P_B + P_C + P_B > P_{3\text{розр.}} \Rightarrow \text{живл. від } P_{CB}, P_{CC}, P_B \\ P_B + P_C + P_B - P_{3\text{розр.}} > 0 \Rightarrow \text{на накопичення} \\ \text{На відрізку часу } t_3 - t_4 \\ \text{якщо } P_C > P_{4\text{розр.}} \Rightarrow \text{живл. від СЕС} \\ \Delta P_C - P_{4\text{розр.}} > 0 \Rightarrow \text{на накопичення} \\ \text{якщо } P_C < P_{4\text{розр.}} \Rightarrow P_B + P_C > P_{4\text{розр.}} \end{array} \right. \quad (7)$$

$P_{\text{розр.}}$ – розрахункова потужність навантаження;

P_B – потужність згенерована ВЕС джерелами

P_C – потужність згенерована СЕС джерелами

P_P – зарезервована потужність

P_B – потужність біодизельного генератора

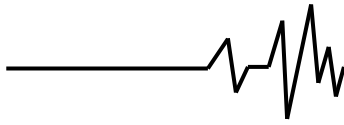
Висновки та пропозиції. Для оцінки ефективності запропонованого методу здійснено дослідження по визначенню графіку навантаження та протягом тривалого спостереження зафіксовані можливі часові зміщення технологічних операцій на вмикання та вимикання. У результаті проведеного дослідження методу забезпечення автономного електропостачання тваринницької ферми на основі комбінування базових та стохастичних джерел енергії було розглянуто основні аспекти, що визначають ефективність і надійність таких систем [4,10,11,12,13,20]. Акцентовано увагу на важливості інтеграції різноманітних джерел відновлювальної енергії, таких як сонячні, вітрові, біогазові установки, а також гідроелектростанції, що дозволяють забезпечити стабільне та економічне постачання електроенергії для тваринницьких ферм. Окрім того, застосування стохастичних методів управління енергетичними потоками дозволяє значно підвищити гнучкість та адаптивність системи до змінних умов навантаження і генерації енергії.

Зважаючи на важливість ефективного використання енергетичних ресурсів у сільському господарстві, результати дослідження підтверджують високий потенціал запропонованого методу для забезпечення автономного електропостачання, зниження витрат на резервування потужностей та підвищення енергетичної безпеки тваринницьких ферм.

1. Перспективність комбінування джерел енергії: Запропонований метод забезпечення автономного електропостачання на основі комбінування базових та стохастичних джерел енергії є перспективним і ефективним. Використання сонячних, вітрових, гідроелектростанцій та біогазових установок дозволяє забезпечити стабільне та економічніше енергопостачання, мінімізуючи залежність від традиційних джерел енергії.

2. Енергоефективність та економія: Розрахунки для ферми великої рогатої худоби показали значну енергетичну ефективність застосування комбінованих джерел енергії. Зокрема, було досягнуто економії 82,8 кВт·год на добу, що свідчить про можливість значного зниження витрат на енергопостачання[2,12,17].

3. Стохастичні методи управління: Використання стохастичних методів управління енергетичними потоками дозволяє враховувати



випадкові коливання в енергоспоживанні та генерації, що забезпечує високу адаптивність системи до змінних умов навантаження та погодних умов. Це дозволяє ефективно коригувати енергетичні потоки і знижувати потребу в резервуванні потужностей.

4. Підвищення надійності та стабільності: Застосування комбінованих енергосистем підвищує надійність та стабільність енергопостачання на фермах, знижуючи ризики, пов'язані з нестабільністю традиційних енергетичних мереж. Важливим аспектом є можливість динамічного керування енергетичними ресурсами без необхідності значного резервування потужностей.

5. Перспективи для сільськогосподарських підприємств: Запропонований метод є важливим для сталого розвитку сільськогосподарських підприємств, зокрема тваринницьких ферм. Використання відновлювальних джерел енергії не лише знижує витрати на енергетичні ресурси, а й сприяє підвищенню енергетичної безпеки, що є критичним у сучасних умовах.

6. Адаптація до змінних умов: Стохастичні підходи дозволяють оптимізувати використання енергетичних установок, що працюють в умовах змінних навантажень та погодних умов. Це дає можливість підвищити ефективність і надійність енергопостачання, знижуючи ризики, пов'язані з відмовами традиційних джерел енергії.

7. Інтеграція відновлювальних джерел: Інтеграція відновлювальних джерел енергії з базовими джерелами дозволяє створювати стабільні та економічно ефективні енергосистеми, що є важливим для забезпечення безперебійного енергопостачання на віддалених сільськогосподарських об'єктах.

Список використаних джерел

1. Калетнік Г.М. Перспективи підвищення енергетичної автономії підприємств апк в рамках виконання енергетичної стратегії України. *Вісник аграрної науки Причорномор'я*, 2019. №4 (104). С. 90–98.

2. Стаднік М.І., Штуць А.А. Оптимізація генераторної групи автономного електропостачання тваринницької ферми з використанням біогазу. *Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції "Молодь і технічний прогрес в АПК" Інноваційні розробки в аграрній сфері*. Т. 2, 4 квітня 2019 р. Харків: ХНТУСГ, 2019. С. 19-20.

3. Стаднік М.І. Оптимізація складу генеруючого обладнання автономного енергопостачання тваринницької ферми при використанні біогазу. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*, 2018. №2 (101). С. 81–88.

4. Стаднік М.І., Грицун А.В., Проценко Д.П. Метод покриття графіку навантаження тваринницької

ферми при автономному електропостачанні, на базі біогазових установок. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. с. 79-87. 2019.

5. Возняк О. М., Штуць А.А. Дослідження системи контролю температури природного газу. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. 2020. №3 (110). С. 34-50.

6. Voznyak O., Shtuts A. Investigation of the process of measurement control of the concentration of carbon dioxide. In: *Traditional and innovative approaches to scientific research: theory, methodology, practice: Scientific monograph*. Riga, Latvia: Baltija Publishing, 2022. P. 1-27.

7. Стаднік М.І., Проценко Д.П., Бабій С.М. Гібридне електропостачання з використанням відновлюваних джерел енергії. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. с. 32-41. 2020.

8. Стаднік М.І., Штуць А.А., Пилипенко О.В. Рівень енергозабезпечення тваринницьких ферм за рахунок біогазу. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. 2021. № 1 (112). С. 100 -112.

9. Гаман Ю.С., Шавьолкін О.О. Керування гібридною системою з відновлювальними джерелами енергії для тваринницької ферми з використанням акумуляторного електротранспорту. *Електромеханічні, інформаційні системи та нанотехнології: матеріали III Міжнародної науково-практичної Інтернет-конференції молодих учених та студентів*, м. Київ, 18 квітня 2024 року. Київ : КНУТД. 2024. С. 40-41.

10. Державна служба статистики України : офіц. сайт. URL: <http://www.ukrstat.gov.ua/> (дата звернення 28.09.2019).

11. Про схвалення Стратегії розвитку експорту продукції сільського господарства, харчової та переробної промисловості України на період до 2026 року : Розпорядження КМУ від 01.07.2019 № 588-р. / Кабінет Міністрів України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/588-2019-%D1%80/> (дата звернення – 28.09.2019).

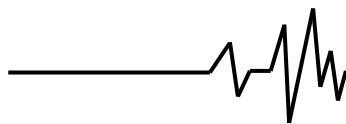
12. Директива № 2008/1/ЄС Європейського Парламенту і Ради про комплексне запобігання і контроль забруднень. URL: https://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/994_b02 (дата звернення 28.09.2019)

13. Грабак Н. Х. Проблеми енергозбереження в АПК України та шляхи її розв'язання. *Екологія. – Наукові праці*. 2010. Вип. 138. Том 150. С. 83–89.

14. Войтюк Д. Г., Синявський О. Ю., Савченко В. В. Вплив якості електричної енергії на технологічні процеси в тваринництві. *Енергетика та автоматика*. 2015. №3. С. 60–69.

15. Калетнік Г. М. Біопаливо. Продовольча, енергетична та економічна безпека України: монографія. К. : Хай-Тек Прес, 2010. 516 с.

16. Плешков С.П. Застосування математичних моделей електроспоживання сільськогосподарського виробництва в системах



автоматичного контролю та управління. *Вісник Харківського державного технічного університету сільського господарства. Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України*. Харків: ХДТУСГ. 2001. Вип.6. С.269–273.

17. Енергетична стратегія України на період до 2035 року «Безпека, нергоефективність, конкуренто-спроможність». 2017. 66 с.

18. Розен В.П., Іншеков Є. М., Калінчик І.В. Оптимізація процесів вироблення електроенергії комбінованою електроенергетичною системою. *Енергетика*. 2013. № 1. С. 20–26.

19. Стаднік М.І., Видмиш А.А., Штуць А.А., Колісник М.А. Інтелектуальні системи в електроенергетиці. Теорія та практика: навч. посіб. Вінницький національний аграрний університет. Вінниця: ТОВ «ТВОРИ». 2020. 332 с.

20. Лежнюк П., Комар В., Собчук, Д. Оцінювання впливу джерел відновлюваної енергії на забезпечення балансової надійності в електричній мережі. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2013. 6. С. 45–47.

21. Bernal-Aguatín J.L., Dufo-Lopez R. Simulation and optimization of stand-alone hybrid renewable energy systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2009. Vol. 13.

22. Bhandari B. et al. Optimization of hybrid renewable energy power systems: A review. *International journal of precision engineering and manufacturing-green technology*. 2015. Vol. 2. No. 1. Pp. 99–112.

References

1. Kaletnik H.M. Perspektyvy pidvyshchennia enerhetychnoi avtonomii pidpriemstv apk v ramkakh vykonannia enerhetychnoi stratehii ukrainy. *Visnyk ahrarnoi nauky Prychornomoria*, 2019. №4 (104). S. 90–98. [in Ukrainian].

2. Stadnik M.I., Shtuts A.A. Optyimizatsiia heneratomoi hrupy avtonomnoho elektropostachannia tvarynnytskoi fermi z vykorystanniam biohazu. *Materialy Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii "Molod i tekhnichniy prohres v APK" Innovatsiini rozrobky v ahrarnii sferi*. T. 2, 4 kvitnia 2019 r. Kharkiv: KhNTUSH, 2019. S. 19–20. [in Ukrainian].

3. Stadnik M.I. Optyimizatsiia skladu heneruiuchoho obladnannia avtonomnoho enerhopostachannia tvarynnytskoi fermi pry vykorystanni biohazu. *Tekhnika, enerhetyka, transport APK*. 2018. №2 (101). S. 81–88. [in Ukrainian].

4. Stadnik M.I., Hrytsun A.V., Protsenko D.P. Metod pokryttia hrafiku navantazhennia tvarynnytskoi fermi pry avtonomnomu elektropostachanni, na bazi biohazovykh ustanovok. *Tekhnika, enerhetyka, transport APK*. S. 79–87. 2019. [in Ukrainian].

5. Vozniak O. M., Shtuts A.A. Doslidzhennia systemy kontroliu temperatury pryrodnoho hazu. *Tekhnika, enerhetyka, transport APK*. 2020. №3 (110). S. 34–50. [in Ukrainian].

6. Voznyak O., Shtuts A. Investigation of the process of measurement control of the concentration of carbon dioxide. In: *Traditional and innovative approaches to scientific research: theory, methodology, practice: Scientific monograph*. Riga, Latvia: Baltija Publishing, 2022. P. 1–27. [in Latvia].

7. Stadnik M.I., Protsenko D.P., Babii S.M. Hibrydne elektropostachannia z vykorystanniam vidnovliuvanykh dzherel enerhii. *Visnyk Vinnytskoho politekhnichnoho instytutu*. S. 32–41. 2020.

8. Stadnik M.I., Shtuts A.A., Pylypenko O.V. Riven enerhozabezpechennia tvarynnytskikh ferm za rakhunok biohazu. *Tekhnika, enerhetyka, transport APK*. 2021. № 1 (112). S. 100–112. [in Ukrainian].

9. Haman Yu.S., Shavolkin O.O. Keruvannia hibrydnoi systemoiu z vidnovliuvalnymy dzherelamy enerhii dlia tvarynnytskoi fermi z vykorystanniam akumuliatomoho elektrotransportu. *Elektromekhanichni, informatsiini systemy ta nanotekhnolohii: materialy III Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi Internet-konferentsii molodykh uchenykh ta studentiv*, m. Kyiv, 18 kvitnia 2024 roku. Kyiv : KNUTD. 2024. S. 40–41. [in Ukrainian].

10. Derzhavna sluzhba statystyky Ukrainy : ofits. sait. URL: <http://www.ukrstat.gov.ua/> (data zvernennia 28.09.2019). [in Ukrainian].

11. Pro skhvalennia Stratehii rozvytku eksportu produktsii silskoho hospodarstva, kharchovoi ta pererobnoi promyslovosti Ukrainy na period do 2026 roku : Rozporiadzhennia KMU vid 01.07.2019 № 588-r. / Kabinet Ministriv Ukrainy. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/588-2019-%D1%80/> (data zvernennia – 28.09.2019). [in Ukrainian].

12. Dyrektyva № 2008/1/Yes Yevropeiskoho Parlamentu i Rady pro kompleksne zapobihannia i kontrol zabrudnen. URL: https://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/994_b02 (data zvernennia 28.09.2019). [in Ukrainian].

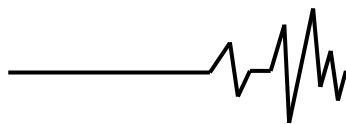
13. Hrabak N. Kh. Problemy enerhozberezhennia v APK Ukrainy ta shliakhy yii rozv'iazannia. *Ekolohiia. – Naukovi pratsi*. 2010. Vyp. 138. Tom 150. S. 83–89. [in Ukrainian].

14. Voitiuk D. H., Syniavskyi O. Yu., Savchenko V. V. Vplyv yakosti elektrychnoi enerhii na tekhnolohichni protsesy v tvarynnytstvi. *Enerhetyka ta avtomatyka*. 2015. №3. S. 60–69. [in Ukrainian].

15. Kaletnik H. M. Biopalyvo. Prodovolcha, enerhetychna ta ekonomichna bezpeka Ukrainy: monohrafiia. K. : Khai-Tek Pres, 2010. 516 s. [in Ukrainian].

16. Plieskov S.P. Zastosuvannia matematychnykh modelei elektrospozhyvannia silskohospodarskoho vyrobnytstva v systemakh avtomatychnoho kontroliu ta upravlinnia. *Visnyk Kharkivskoho derzhavnoho tekhnichnoho universytetu silskoho hospodarstva. Problemy enerhozabezpechennia ta enerhozberezhennia v APK Ukrainy*. Kharkiv: KhDTUSH. 2001. Vyp.6. S.269–273. [in Ukrainian].

17. Enerhetychna stratehiia Ukrainy na period do 2035 roku «Bezpeka, nerhoeфективnist, konkurento-spromozhnist». 2017. 66 s. [in Ukrainian].



18. Rozen V. P., Inshekov Ye. M., Kalinchyk I. V. Optymizatsiia protsesiv vyroblennia elektroenerhii kombinovanoi elektroenerhetychnoiu systemoiu. *Enerhetyka*. 2013. № 1. S. 20–26. [in Ukrainian].

19. Stadnik M.I., Vydmysh A.A., Shtuts A.A., Kolisnyk M.A. Intelktualni systemy v elektroenerhetytsi. *Teoriia ta praktyka: navch. posib. Vinnytskyi natsionalnyi ahrarnyi universytet. Vinnytsia: TOV «TVORY»*. 2020. 332 s. [in Ukrainian].

20. Lezhniuk P., Komar V., Sobchuk, D. Otsiniuvannia vplyvu dzherel vidnovliuvanoi enerhii na zabezpechennia balansovoi nadiinosti v elektrychnii merezhi. *Visnyk Vinnytskoho politekhnichnoho instytutu*. 2013. 6. S. 45–47. [in Ukrainian].

21. Bernal-Agustín J.L., Dufo-Lopez R. Simulation and optimization of stand-alone hybrid renewable energy systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2009. Vol. 13. [in Netherlands].

22. Bhandari B. et al. Optimization of hybrid renewable energy power systems: A review. *International journal of precision engineering and manufacturing-green technology*. 2015. Vol. 2. No. 1. Pp. 99–112. [in South Korea].

RESEARCH ON THE METHOD OF ENSURING AUTONOMOUS POWER SUPPLY FOR A LIVESTOCK FARM BASED ON THE COMBINATION OF BASIC AND STOCHASTIC ENERGY SOURCES

The article discusses a method for ensuring autonomous power supply for a livestock farm, based on the combination of basic and stochastic energy sources. The proposed method involves the use of various sources of electricity, such as solar power plants (SPP), wind power plants (WPP), hydroelectric power plants (HPP), and biogas installations, taking into account the farm's changing load schedules throughout the day. A distinctive

feature of the method is the possibility of dynamically managing energy resources, considering their stochastic characteristics depending on changes in load, which ensures reliable and efficient power supply.

One of the main advantages of the proposed method is the use of stochastic approaches for managing energy sources. The stochastic method accounts for random fluctuations in energy production from renewable sources, such as solar and wind, as well as unpredictable changes in the farm's energy consumption. This enables accurate forecasting and adjustment of energy flows, optimizing energy use and reducing the need for power capacity reserves. The application of stochastic methods ensures high adaptability of the system to changing load and generation conditions, making it more flexible and reliable.

The proposed approaches for tracking the farm's load schedule allow for effective management of energy installations, ensuring stable electricity supply even under changing load conditions. An important aspect is that the use of this method significantly reduces the need for power capacity reserves, lowering energy resource costs and increasing the overall system efficiency.

The proposed method is promising for use in autonomous power supply systems for livestock farms, providing stable and economical electricity supply with minimal power capacity reserve costs. The use of stochastic methods allows optimizing energy flow management, improving the reliability and efficiency of the system, which contributes to the sustainable development of agricultural enterprises, reducing their dependence on external energy sources, and enhancing energy security.

Keywords: autonomous power supply, energy source combination, stochastic sources, biogas installation, energy efficiency, livestock farm, load schedule, energy supply management system.

Відомості про авторів

Стаднік Микола Іванович – д.т.н., професор, викладач кафедри «Електроенергетики, електротехніки та електромеханіки» Вінницького національного аграрного університету (вул. Сонячна, 3, м. Вінниця, 21008, Україна. stadnik1948@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-3895-9607>).

Штуць Андрій Анатолійович - к.т.н. старший викладач кафедри «Електроенергетики, електротехніки та електромеханіки» Вінницького національного аграрного університету (вул. Сонячна, 3, м. Вінниця, 21008, Україна, email: shtuts1989@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-4242-2100>).

Єленич Анатолій Павлович – асистент кафедри «Агроінженерії та технічного сервісу» Вінницького національного аграрного університету (вул. Сонячна, 3, м. Вінниця, 21008, Україна, email: a.elenech@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0002-7424-1822>).

Stadnik Mykola – Doctor of Technical Sciences, Department of Electric Power Engineering, Electrical Engineering and Electromechanics, Vinnitsa National Agrarian University (3, Solnechna str., Vinnitsa, 21008, Ukraine, email: stadnik1948@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-3895-9607>).

Shtuts Andrii - Doctor of Technical Sciences, Senior Lecturer, Department of Electric Power Engineering, Electrical Engineering and Electromechanics, Vinnitsa National Agrarian University (3, Soniachna st. , Vinnitsa, 21008, Ukraine, email: shtuts1989@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-4242-2100>).

Yelenych Anatoliy – Assistant of the Department of “Agroengineering and Technical Service” of the Vinnitsa National Agrarian University (3, Solnechnaya St, Vinnitsa, 21008, Ukraine, e-mail: a.elenech@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0002-7424-1822>).